

Título: Algoritmos genéticos en control activo de ruido

Autor: Sara Martín Segovia

Máster Universitario Oficial: Máster Universitario en Ingeniería Acústica de la Edificación y Medio Ambiente

Tutor: Antonio Mínguez Olivares

Director: Juan José Gómez Alfageme

Presidente: Danilo Simón Zorita

Vocal: Juan Sancho Gil

Vocal Secretario: José Luis Sánchez Bote

Fecha de Lectura: Julio 2015



# Índice

Índice	i
Índice de figuras	v
Índice de ecuaciones	viii
Resumen	ix
Summary	x
1 Introducción	1
1.1 Introducción	3
1.2 Marco histórico	3
1.3 Objetivos	5
1.4 Estructura	6
2 Introducción al control activo de ruido	9
2.1 Concepto	11
2.2 Necesidad tecnológica	12
2.3 Fundamentos acústicos	14
2.3.1 Principio de Young	14
2.3.2 Principio de Huygens	17
2.3.3 Acoplamiento de fuentes acústicas	18
2.3.4 Control activo en recintos	20
2.4 Tipos de ruido	20
2.5 Entornos acústicos de cancelación	21

3	Sistemas de control	25
3.1	Introducción	27
3.2	Control tipo lazo cerrado (feedback)	29
3.3	Control tipo lazo abierto (feedforward)	31
3.4	Algoritmos de control	34
3.4.1	Filtro FIR	36
3.4.2	Filtro IIR	37
3.4.3	Algoritmos adaptativos	40
	• Algoritmo adaptativo LMS	40
	• Algoritmo adaptativo de entrada filtrada (Filtered-X LMS)	42
	• Algoritmos genéticos	43
4	Diseño del sistema de control activo de ruido	47
4.1	Fases del proceso	49
4.2	Diseño en MATLAB	50
5	Simulación del algoritmo genético. Resultados obtenidos	55
5.1	Resultados con ruido aleatorio	57
5.1.1	Variación del retardo (delay1 y delay2)	57
5.1.2	Número de filtros genéticos	60
5.1.3	Longitud de los filtros genéticos (coeficientes, -cromosomas-)	62
5.1.4	Ventana de análisis (bloque de muestras)	63
5.1.5	Mutación	64
5.2	Resultados con señal sinusoidal + ruido	67



5.2.1	Variación del retardo (delay1 y delay2)	67
5.2.2	Número de filtros genéticos	69
5.2.3	Longitud de los coeficientes	70
5.2.4	Ventana de análisis (bloque de muestras)	72
5.2.5	Mutación	73
6	Conclusiones	77
7	Referencias bibliográficas	81



## Índice de figuras

Figura 1. Patente de Paul Lueg.	3
Figura 2. Sistema de control activo de ruido cerca del reposacabezas del pasajero.	4
Figura 3. Sistema de cancelación acústica propuesto por Conover.	5
Figura 4. Interferencia destructiva de ondas de presión acústica de la misma frecuencia.	11
Figura 5. Elementos de un sistema de control activo de ruido.	12
Figura 6. Respuesta típica de un sistema pasivo de control	13
Figura 7. Principio de Young. Cancelación acústica.	15
Figura 8. Atenuación producida en la superposición de dos sinusoides idénticas, invertidas en fase, en función de los errores de fase y amplitud.	15
Figura 9. Dimensiones de la cancelación por interferencia destructiva, centradas en un punto P. a) Una fuente secundaria y b) por dos fuentes secundarias.	16
Figura 10. Principio de Huygens. Propagación de las ondas.	17
Figura 11. Principio de Huygens. La superficie engloba a una zona de silencio.	17
Figura 12. Cancelación acústica de una fuente mediante una superficie de Huygens.	18
Figura 13. Atenuación acústica en función de la distancia entre las fuentes.	19
Figura 14. Disminución de la potencia acústica en función de la distancia entre las fuentes.	19
Figura 15. Reducción de la potencia acústica radiada por una fuente puntual en presencia de un array de fuentes secundarias	22
Figura 16. Configuración de un sistema de control activo de ruido en un conducto.	23
Figura 17. Elementos de un sistema de control activo de ruido acústico.	27
Figura 18. Sistema de control activo de ruido tipo feedback.	30

Figura 19. Diagrama de bloques de un sistema de control activo de ruido de lazo cerrado.	31
Figura 20. Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado transformado en un sistema de control de lazo abierto.	31
Figura 21. Sistema de control activo de ruido tipo feedforward.	32
Figura 22. Diagrama de bloques de un sistema de control activo de ruido de lazo abierto.	33
Figura 23. Elementos de un sistema digital de control activo de ruido.	35
Figura 24. Estructura de un filtro digital tipo FIR.	37
Figura 25. Estructura de un filtro digital tipo IIR.	38
Figura 26. Configuración de un filtro adaptativo.	40
Figura 27. Gradiente de la superficie del error cuadrático instantáneo.	41
Figura 28. Configuración adaptativa del sistema de control activo de ruido.	42
Figura 29. Ciclo del algoritmo genético.	44
Figura 30. Cruce de cromosomas en el algoritmo genético.	45
Figura 31. Mutación de cromosomas.	45
Figura 32. Esquema de un sistema de control activo de ruido.	49
Figura 33. Diagrama de bloques de un algoritmo genético.	50
Figura 34. Secuencia de operaciones de un algoritmo genético.	51
Figura 35. Retardos del sistema.	58
Figura 36. Señal de error con delay1 = 3 (izq) y delay1 = 8 (dcha).	58
Figura 37. Señal de error con delay1 = 20 y delay 2 = 5	59
Figura 38. Señal de error con delay2 = 5 (izq) y delay2 = 15 (dcha).	60
Figura 39. Señal de error con número de filtros=4 (izq) y número de filtros=12 (dcha).	61

Figura 40. Señal de error con número de filtros=50.	61
Figura 41. Señal de error longitud de coeficientes del filtro=16.	62
Figura 42. Señal de error con longitud de coeficientes del filtro=32.	63
Figura 43. Señal de error con ventana de análisis de 512 muestras.	64
Figura 44. Señal de error con valor de mutación del 5%.	65
Figura 45. Señal de error con valor de mutación del 40%.	66
Figura 46. Señal de error con valor de mutación del 20%.	67
Figura 47. Señal de error con delay1 = 3 (izq) y delay1 = 12 (dcha).	68
Figura 48. Señal de error con número de filtros=4 (izq) y número de filtros=8 (dcha).	69
Figura 49. Señal de error con número de filtros=15.	70
Figura 50. Señal de error longitud de coeficientes del filtro=16.	71
Figura 51. Señal de error longitud de coeficientes del filtro=4.	72
Figura 52. Señal de error con ventana de análisis de 64 muestras (izq) y 512 muestras (dcha).	73
Figura 53. Señal de error con valor de mutación del 5%.	74
Figura 54. Señal de error con valor de mutación del 20%.	75



## Índice de ecuaciones

- (1) Ecuación longitud de onda
- (2) Fórmula de Rayleigh para el cálculo las frecuencias propias
- (3) Condición de causalidad
- (4) Condición de causalidad
- (5) Salida del filtro FIR
- (6) Cálculo de la señal de error
- (7) Salida del filtro FIR
- (8) Señal de error
- (9) Error cuadrático instantáneo
- (10) Actualización de coeficientes  $c(k)$
- (11) Gradiente o derivada del error cuadrático instantáneo
- (12) Actualización de los coeficientes según el algoritmo LMS
- (13) Relación grado de aptitud del cromosoma y error cuadrático medio de la señal de error
- (14) Error cuadrático medio

## Resumen

Este proyecto se centra en la implementación de un sistema de control activo de ruido mediante algoritmos genéticos. Para ello, se ha tenido en cuenta el tipo de ruido que se quiere cancelar y el diseño del controlador, parte fundamental del sistema de control. El control activo de ruido sólo es eficaz a bajas frecuencias, hasta los 250 Hz, justo para las cuales los elementos pasivos pierden efectividad, y en zonas o recintos de pequeñas dimensiones y conductos.

El controlador ha de ser capaz de seguir todas las posibles variaciones del campo acústico que puedan producirse (variaciones de fase, de frecuencia, de amplitud, de funciones de transferencia electro-acústicas, etc.). Su funcionamiento está basado en algoritmos FIR e IIR adaptativos. La elección de un tipo de filtro u otro depende de características tales como linealidad, causalidad y número de coeficientes.

Para que la función de transferencia del controlador siga las variaciones que surgen en el entorno acústico de cancelación, tiene que ir variando el valor de los coeficientes del filtro mediante un algoritmo adaptativo. En este proyecto se emplea como algoritmo adaptativo un algoritmo genético, basado en la selección biológica, es decir, simulando el comportamiento evolutivo de los sistemas biológicos.

Las simulaciones se han realizado con dos tipos de señales: ruido de carácter aleatorio (banda ancha) y ruido periódico (banda estrecha). En la parte final del proyecto se muestran los resultados obtenidos y las conclusiones al respecto.

## Summary

This project is focused on the implementation of an active noise control system using genetic algorithms. For that, it has been taken into account the noise type wanted to be canceled and the controller design, a key part of the control system. The active noise control is only effective at low frequencies, up to 250 Hz, for which the passive elements lose effectiveness, and in small areas or enclosures and ducts.

The controller must be able to follow all the possible variations of the acoustic field that might be produced (phase, frequency, amplitude, electro-acoustic transfer functions, etc.). It is based on adaptive FIR and IIR algorithms. The choice of a kind of filter or another depends on characteristics like linearity, causality and number of coefficients.

Moreover, the transfer function of the controller has to be changing filter coefficients value through an adaptive algorithm. In this project a genetic algorithm is used as adaptive algorithm, based on biological selection, simulating the evolutionary behavior of biological systems.

The simulations have been implemented with two signal types: random noise (broadband) and periodic noise (narrowband). In the final part of the project the results and conclusions are shown.

# 1

## Introducción



En este capítulo se sitúa el control activo de ruido en su contexto histórico, exponiendo las limitaciones y el desarrollo de esta técnica desde el comienzo de su estudio hasta el día de hoy. Posteriormente se muestran los objetivos del proyecto para exponer la estructura a partir de los objetivos marcados.

## 1.1 Introducción

Llamamos ruido a los sonidos que no son deseados. El control y reducción del mismo es un problema de gran complejidad, ya que hay que tener en cuenta las componentes temporales, frecuenciales y espaciales que presenta.

El ruido produce molestias, distracción, perturbación e incluso daños irreversibles en la audición. A medida que progresamos social y tecnológicamente, se incrementa también la generación de ruido (ruido del motor de los coches, de los aviones, de los trenes...). Para hacer frente al crecimiento de la producción de ruido es necesaria una evolución de las técnicas de control.

## 1.2 Marco histórico

El control activo de ruido, basado en la atenuación de ruido acústico mediante la superposición de ondas de presión en contrafase, se remonta al año 1934 con la primera patente de un sistema de control de ruido llevada a cabo por el alemán Paul Lueg [1].

Dicha patente describe cómo conseguir una cancelación acústica del ruido en el interior de un conducto.

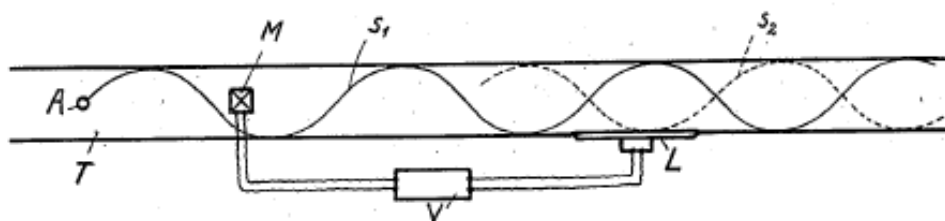


Figura 1. Patente de Paul Lueg.

En la figura anterior se muestra cómo se utiliza un micrófono  $M$  para detectar el ruido acústico sinusoidal  $S_1$ , que se propaga en el interior de un conducto. Tal señal pasa por un controlador  $V$ , que produce mediante un altavoz  $L$ , nuevas ondas de presión  $S_2$ , en oposición de fase a las iniciales  $S_1$ . De esta forma, al sumarse ambas ondas de

presión, se produce una interferencia destructiva en el interior del tubo, con la consiguiente disminución del ruido.

Olson y May [2] idearon un sistema de control activo de ruido que permitía atenuar el ruido acústico de aviones y automóviles, en el entorno del reposacabezas del pasajero.

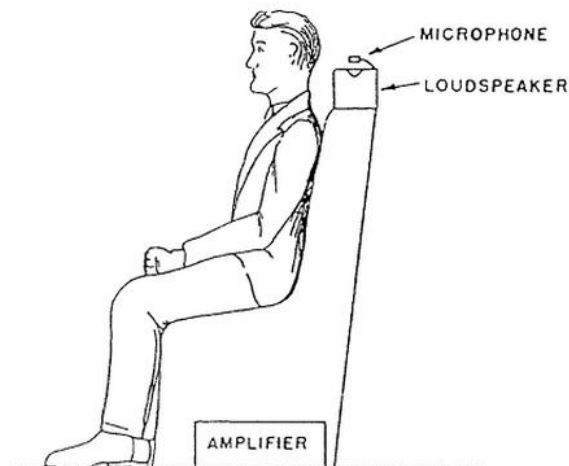


Figura 2. Sistema de control activo de ruido cerca del reposacabezas del pasajero.

El sistema consistía en un micrófono, un amplificador y un altavoz (Figura 2). El amplificador estaba discretamente situado bajo el asiento y el micrófono y altavoz, muy próximos entre sí, situados en el reposacabezas. La señal de micrófono era amplificada e invertida en fase, para producir por medio del altavoz, ondas de presión que anularan a las existentes en un principio.

Por otra parte, Conover [3] aplicó la técnica del control activo de ruido para atenuar el ruido que producían los transformadores de alta potencia de las estaciones eléctricas. Dicho ruido es totalmente periódico (fundamental -60 Hz- y armónicos). Su idea consistía en generar ondas sinusoidales de las mismas frecuencias que emitía el transformador (60 Hz y múltiplos), y variar la amplitud y la fase de cada una, hasta conseguir la máxima reducción de la presión acústica en una determinada dirección (Figura 3).

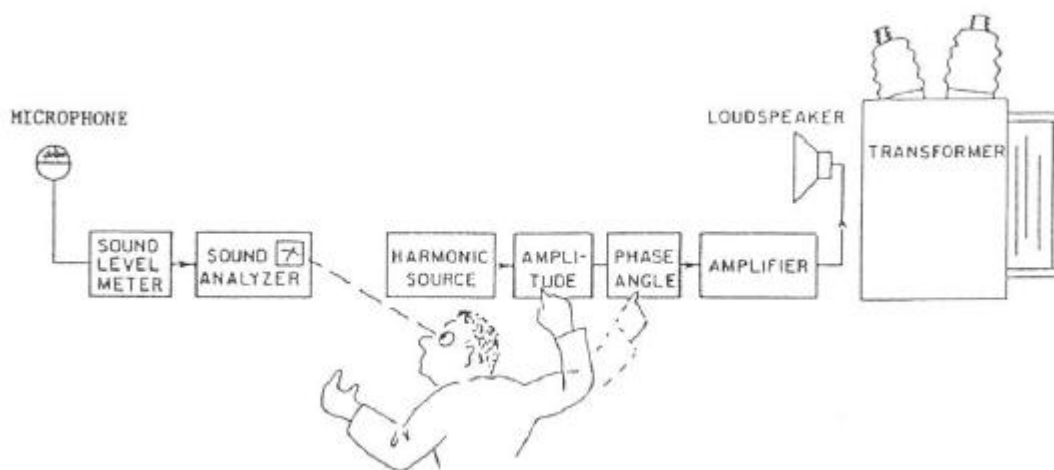


Figura 3. Sistema de cancelación acústica propuesto por Conover.

La tecnología de esta época en la que se produjeron los primeros estudios sobre el control activo de ruido no permitía llevar a la práctica las ideas anteriormente comentadas, por lo que durante mucho tiempo dichas ideas estuvieron en el olvido. Esto cambió cuando se empezaron a desarrollar las primeras herramientas de procesamiento digital de la señal en los años 60 y 70, más concretamente el procesamiento adaptativo de señales. A mediados de los años 70 apareció uno de los artículos más importantes en la materia: Widrow [4]. La principal aportación de este trabajo es la posibilidad de poder anular ruidos no periódicos e incluso variantes en el tiempo.

En esta última década empiezan a comercializarse los primeros productos de control activo de ruido, principalmente en los medios de transporte ya que es posible atenuar el ruido acústico en el interior de los vehículos sin necesidad de aumentar el peso y el volumen de los mismos. Esto trae consigo vehículos más ligeros y, por tanto, más eficientes, con menor consumo de combustible.

Los procesadores digitales de señal, capaces de realizar millones de operaciones por segundo y a un precio económico, han permitido este desarrollo. Para poder realizar estos sistemas de control es necesario hacer uso de dos disciplinas: acústica y procesamiento digital de señales. Hasta hace poco tiempo parecía que estas dos disciplinas no tenían nada en común, y tal vez esta razón puede haber sido la causa del retraso tecnológico que ha sufrido el control activo de ruido.

## 1.3 Objetivos

El objetivo de este proyecto es la implementación de un sistema de control activo de ruido mediante algoritmos genéticos. Para ello, se definen los siguientes objetivos parciales:



- Exposición de la base teórica sobre la que se sustenta el proyecto.
- Generación, mediante el lenguaje de programación Matlab, de un código que permita obtener una reducción de ruido no deseado.
- Validación del código propuesto mediante simulaciones, con el fin de obtener los parámetros óptimos de funcionamiento.
- Evaluación de las ventajas e inconvenientes de usar este tipo de algoritmo en el control activo de ruido.

### **1.4 Estructura**

El proyecto está estructurado en 7 capítulos, organizados de manera que se pueda seguir su desarrollo desde el contexto histórico hasta la evaluación del algoritmo diseñado.

En el capítulo 2 se expone una introducción al concepto de cancelación activa de ruido, justificando la necesidad tecnológica de esta técnica para mejorar las prestaciones que ofrecen las técnicas pasivas de control. Posteriormente se detallan los fundamentos acústicos y se enumeran los distintos tipos de ruido acústico y los entornos acústicos de cancelación.

En el capítulo 3 se da una introducción de los elementos que forman un sistema de control activo de ruido. Se estudian los diferentes sistemas de control, analizando qué tipo de configuración, de lazo abierto (feedforward) o de lazo cerrado (feedback), se emplea dependiendo del tipo de ruido que se desea cancelar. Por último se presentan los distintos algoritmos de control, FIR e IIR, y sus principales ventajas e inconvenientes, así como los algoritmos adaptativos utilizados en los sistemas de control: algoritmo adaptativo LMS, algoritmo adaptativo de entrada filtrada Filter-X LMS y algoritmo adaptativo genético, en el que está basado este proyecto, el cual mejora la complejidad del anterior ya que no es necesaria la estimación de funciones de transferencia electro-acústicas para realizar el filtrado de la señal de entrada.

El capítulo 4 se centra en las fases del diseño del sistema de control activo de ruido y en el diseño del algoritmo en el software de cálculo técnico MATLAB, para posteriormente, en el capítulo 5, realizar simulaciones del algoritmo genético con los diferentes parámetros en los que está basado, utilizando tanto ruido aleatorio como periódico, y mostrando las gráficas de los resultados obtenidos.

En el capítulo 6 de conclusiones se hace una recapitulación del proyecto, teniendo en cuenta los objetivos propuestos y los resultados alcanzados; por último, en el capítulo 7 se muestra la bibliografía utilizada durante el desarrollo del proyecto.



# **2**

## **Introducción al control activo de ruido**



En este capítulo se presenta una introducción al concepto de cancelación activa de ruido, justificando la necesidad tecnológica de esta técnica para mejorar las prestaciones que ofrecen las técnicas pasivas de control. Además, se detallan los fundamentos acústicos y se enumeran los distintos tipos de ruido acústico y los entornos acústicos de cancelación.

## 2.1 Concepto

El control activo de ruido es una técnica capaz de atenuar, eliminar o cancelar el ruido acústico no deseado presente en un determinado medio. La atenuación de dicho ruido se realiza mediante la emisión de otro ruido acústico de igual frecuencia y amplitud pero desfasada  $180^\circ$  a través de dispositivos electroacústicos, de manera que en la zona de interés del medio (zona de silencio) las ondas de presión acústica estén en oposición de fase, produciéndose una interferencia destructiva, como se muestra en la Figura 4.

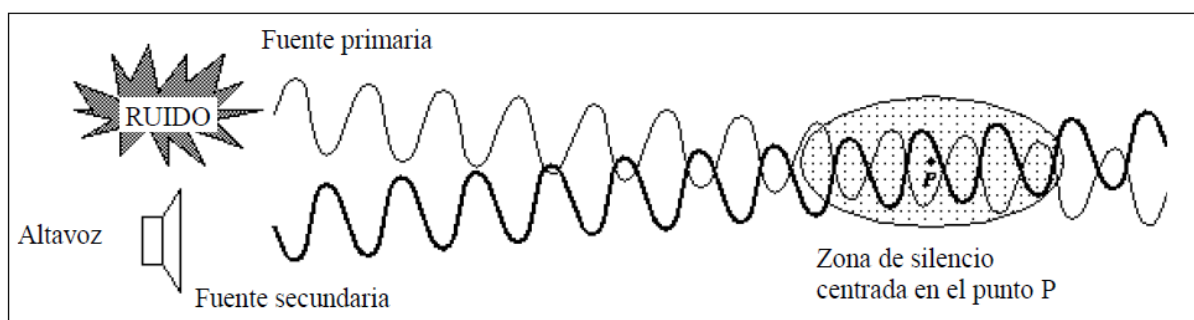


Figura 4. Interferencia destructiva de ondas de presión acústica de la misma frecuencia.

Existen dos técnicas diferentes para llevarlo a cabo: la cancelación activa de ruido y el control activo estructural. Mediante ambas técnicas se puede conseguir la atenuación del ruido acústico, sin embargo el ruido que generan se produce con dispositivos electroacústicos diferentes. En el primer caso, mediante fuentes acústicas (altavoces), y en el segundo mediante dispositivos electroacústicos que producen vibraciones en una estructura, como por ejemplo actuadores piezoeléctricos, que modificando la vibración de la estructura y por tanto alterando la emisión de ruido acústico en la zona de interés.

Los elementos que constituyen el sistema de control activo de ruido son los siguientes:

- Sensor de referencia (micrófono): capta la información que necesitamos del ruido a eliminar.
- Controlador: varía las características de amplitud y fase de la señal de referencia.

- Actuador (altavoz): genera ondas de presión.
- Sensor de realimentación (micrófono): para que el controlador modifique su funcionamiento y así conseguir disminuciones de presión acústica donde esté colocado el sensor.

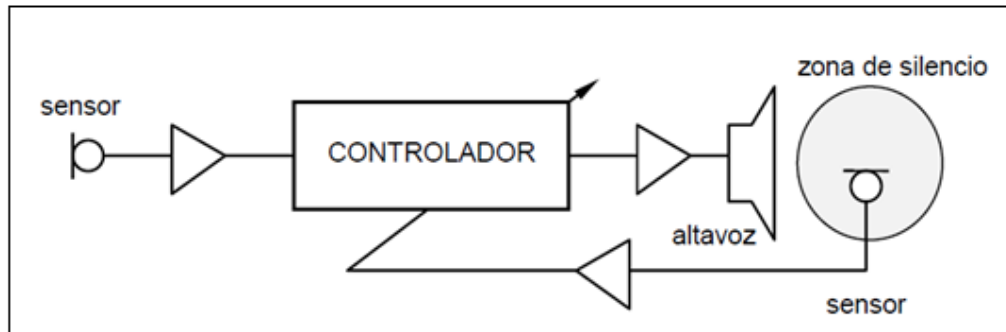


Figura 5. Elementos de un sistema de control activo de ruido.

El sistema puede generalizarse para un sistema múltiple, es decir, para conseguir la atenuación de varias zonas espaciales en un determinado recinto. En este caso, se necesitarán tantos actuadores y sensores de error como zonas a cancelar. El controlador es único y su complejidad es directamente proporcional al número de zonas en las que se quiera conseguir una atenuación de ruido. La señal de referencia que entra al controlador es única, aunque esta puede proceder de varios sensores.

La efectividad de la cancelación del ruido depende de las características individuales de todos y cada uno de los elementos. La linealidad de los subsistemas y transductores (micrófonos y altavoces) y la correcta ubicación de estos en el escenario de cancelación, son de vital importancia para conseguir la máxima disminución del nivel de presión acústica.

Por encima de todos los elementos hay que destacar el controlador. Este deberá modificar sus parámetros de funcionamiento rápidamente conforme varían las características del ruido. La adaptabilidad del controlador es imprescindible para lograr una correcta cancelación en todo momento.

## 2.2 Necesidad tecnológica

Existen varios tipos de ruido acústico que pueden ser objeto de control. Las características del ruido dependen fundamentalmente de la fuente acústica que lo origina y,

en menor medida, del camino acústico recorrido desde la propia fuente hasta el punto objeto de control.

El control de ruido se puede llevar a cabo mediante técnicas activas y/o técnicas pasivas. El sistema de control pasivo se realiza mediante sistemas acústicos tales como silenciadores, filtros acústicos, resonadores, barreras acústicas. Estas técnicas ofrecen muy buenos resultados para frecuencias medias y altas, no siendo así para bajas frecuencias (<500 Hz), ya que la longitud de onda se va haciendo cada vez mayor (1) y para mantener los resultados de aislamiento y absorción de los sistemas acústicos comentados anteriormente, habría que aumentar la masa y el espesor de estos proporcionalmente al aumento de la longitud de onda. Por ejemplo, una onda de presión acústica de frecuencia 1000 Hz tiene una longitud de onda de unos 34 cm. Sin embargo, para una frecuencia de 100 Hz, la longitud de onda aumenta hasta los 3,4 m.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [m] \quad (1)$$

donde  $v$  es la velocidad del sonido en el aire. ( $v=343$  m/s)

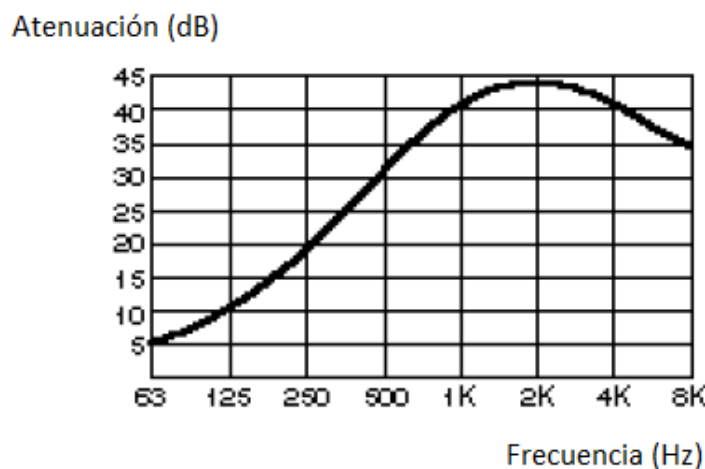


Figura 6. Respuesta típica de un sistema pasivo de control

Estas soluciones de aumentar el espesor de los materiales no son prácticas en la mayoría de las situaciones, como por ejemplo podría ser en la reducción de ruido en vehículos de transporte (automóviles, aviones, trenes, etc.), ya que supondría vehículos menos ligeros, mayor consumo de combustible, más robustos, mayor coste de material, etc.

Es aquí, justamente en estas aplicaciones, donde puede aplicarse la técnica de control activo de ruido y complementar las prestaciones de los elementos pasivos para bajas frecuencias.



## 2.3 Fundamentos acústicos

Como se ha mencionado anteriormente, la poca eficacia de los métodos pasivos de control para la atenuación de las ondas de presión acústica de baja frecuencia, hace necesario buscar otro tipo de solución ante el problema del ruido.

Las técnicas activas de control generan un nuevo ruido que se añade al existente, del cual se quiere atenuar su nivel de presión sonora. Dependiendo de la situación de la nueva fuente de ruido (fuente secundaria) con respecto a la fuente original (fuente primaria), se puede conseguir una disminución de la energía acústica global, en todo el espacio tridimensional, o únicamente en pequeñas zonas de cancelación (zona de silencio). En el primer caso, se produce un acoplamiento acústico de fuentes generadoras de ruido, cuando las mismas están próximas entre si [4].

En el otro caso, se trata simplemente de interferencias destructivas de las ondas de presión acústica, principio de superposición [5].

Por tanto, los principios acústicos en los que se fundamente el control activo de ruido son los siguientes:

- Interferencia destructiva de dos sinusoides
- Acoplamiento acústico de fuentes

La interferencia destructiva de dos sinusoides es la base física que justifica la atenuación acústica por métodos activos. Esta idea está enunciada en el *Principio de Young* y en el *Principio de Huygens*.

### 2.3.1 Principio de Young

Este principio establece que *una onda de presión que se propaga en el espacio puede ser cancelada mediante la superposición de otra onda invertida en fase*. Este efecto puede apreciarse en el siguiente diagrama de bloques para el caso de un tono.

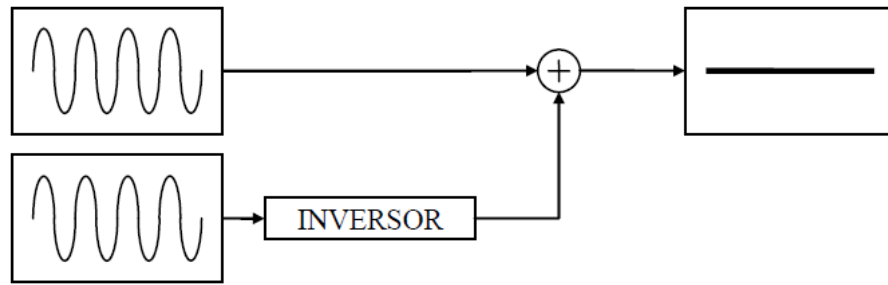


Figura 7. Principio de Young. Cancelación acústica.

La idea es simple pero su realización práctica no lo tanto. La sinusoide canceladora ha de ser una imagen exacta, pero invertida, de la sinusoide inicial. Si existen variaciones de amplitud, fase y/o frecuencia, la cancelación se pierde rápidamente.

Para poder verlo con claridad, a continuación se presenta una gráfica que muestra la cancelación que se obtiene en función de las variaciones de amplitud y fase de las dos sinusoides. En el caso ideal la cancelación es total ( $\infty$  dB).

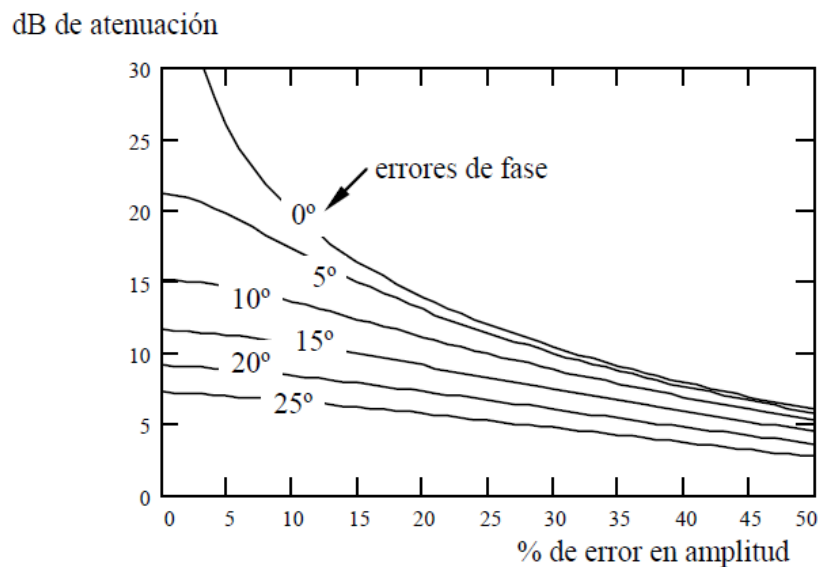


Figura 8. Atenuación producida en la superposición de dos sinusoides idénticas, invertidas en fase, en función de los errores de fase y amplitud.

Se puede apreciar que para conseguir atenuaciones superiores a 20 dB es necesario que el error en fase sea inferior a 5 grados y que el error en amplitud sea inferior al 5%, de sus valores ideales. Si se desea cancelar una onda de presión acústica completamente, es necesario cancelar en todos y cada uno de los puntos del medio elástico por el que se propaga dicha onda. Lógicamente, esto es prácticamente imposible, ya que cada fuente

acústica tiene su propio diagrama de radiación y es imposible realizar tal superposición en todos los puntos.

En situaciones reales no se fijan objetivos de cancelación tan exigentes. Generalmente se pretende conseguir pequeñas zonas de silencio o de atenuación, en aquellos lugares más críticos, donde una persona pueda percibir la sensación de atenuación acústica, es decir, en una zona de dimensión tal que englobe la cabeza. La dimensión máxima de esta zona virtual de cancelación depende de la frecuencia máxima a cancelar o a atenuar. Por ejemplo, una frecuencia de 100 Hz tiene una longitud de onda de 3,4 metros y la zona de cancelación tendría unas dimensiones equivalentes a la de una esfera de diámetro unos 34 centímetros. Lógicamente, conforme se aumenta la frecuencia, estas dimensiones se van haciendo más pequeñas y no resulta práctico para frecuencias superiores a 500 Hz. En cualquier caso, hay que recordar que la técnica de control activo de ruido sólo es necesaria para las bajas frecuencias, justamente para las cuales los elementos pasivos pierden efectividad.

Es posible alargar la zona de cancelación de la forma esférica de diámetro  $\lambda/10$  a una forma elipsoidal, de diámetro  $\lambda/10$  y largo  $\lambda/2$  [6]. Dicho aumento puede conseguirse cuando se utilizan dos fuentes secundarias, una de ellas para cancelar la presión acústica en un determinado punto del espacio y la otra para cancelar la velocidad de las partículas del medio en ese mismo punto. Este incremento resulta importante para situaciones en las que la frecuencia del ruido empieza a ser de un valor alto, en torno a los 500 Hz, y la zona de cancelación esférica producida por una sola fuente empieza a resultar pequeña (7 centímetros).

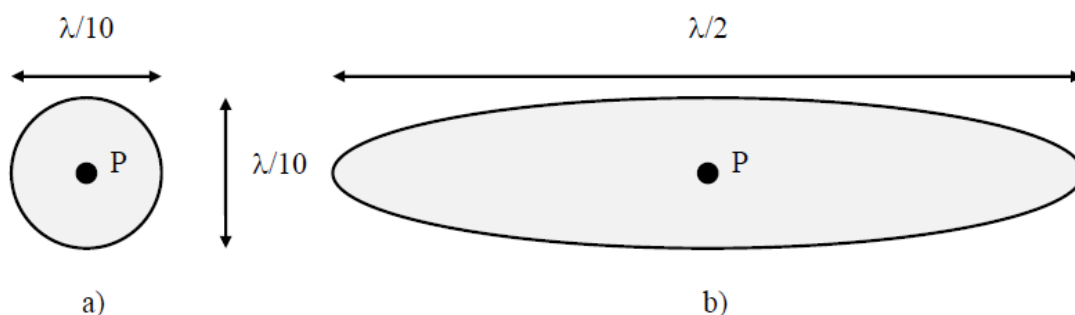


Figura 9. Dimensiones de la cancelación por interferencia destructiva, centradas en un punto P. a) Una fuente secundaria y b) por dos fuentes secundarias.

### 2.3.2 Principio de Huygens

Está basado en el principio de Young y proporciona un procedimiento para llevar a cabo la cancelación acústica en una determinada región del espacio. En la segunda mitad del siglo XVII, el científico holandés Christian Huygens elaboró un método geométrico para explicar la propagación de las ondas utilizando el concepto de que cada punto del medio alcanzado por la onda se comporta como un nuevo foco emisor o foco secundario.

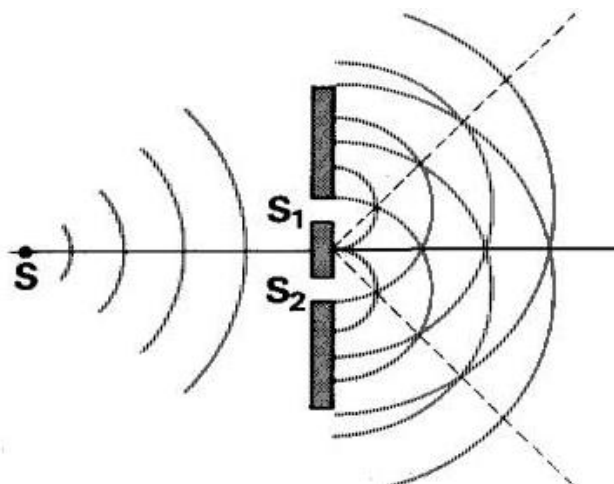


Figura 10. Principio de Huygens. Propagación de las ondas.

El principio de Huygens establece que *el campo acústico en cualquier punto en el interior de un espacio, limitado por una superficie cerrada, producido por una fuente exterior a la misma, puede ser reproducido de una forma exacta, mediante un conjunto de fuentes acústicas secundarias distribuidas alrededor de dicha superficie.*

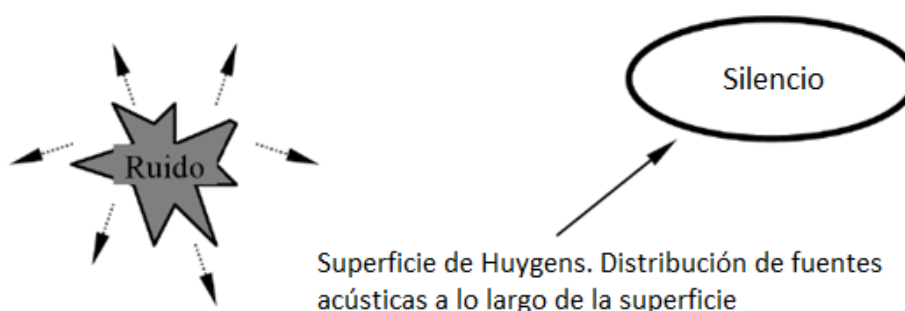


Figura 11. Principio de Huygens. La superficie engloba a una zona de silencio. Las fuentes acústicas en la superficie generan un modelo invertido del campo acústico.

*Zona de silencio.* La presión acústica en todos los puntos que engloba una superficie cerrada, puede anularse si se generan ondas acústicas en todos los puntos de la misma, de forma que sean réplicas invertidas en fase, de las ondas de presión que inciden inicialmente en dicha superficie.

Un procedimiento para cancelar fuentes acústicas ruidosas es encerrarlas dentro de una superficie de Huygens. Generando una réplica invertida del campo acústico en la superficie es posible anular la presión acústica que genera dicha fuente, en este caso, en el exterior de la misma.

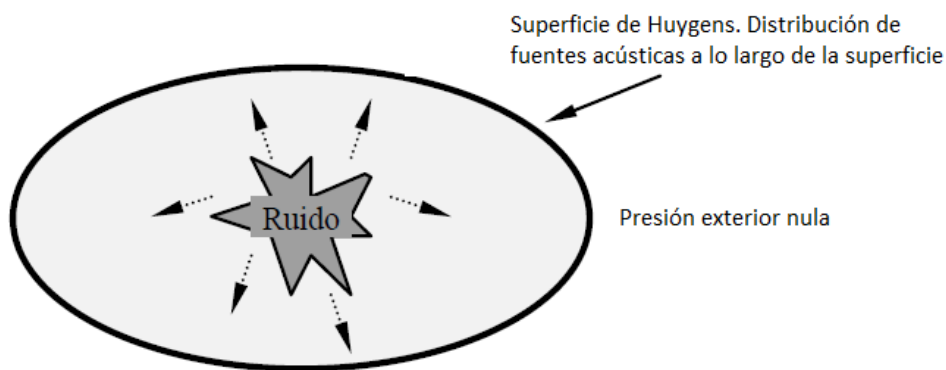


Figura 12. Cancelación acústica de una fuente mediante una superficie de Huygens.

El problema que presenta el principio de Huygens es que son necesarias infinitas fuentes acústicas dispuestas a lo largo de la superficie cerrada. Por lo tanto, no es posible realizar tal experimento en una implementación real. Sin embargo, puede hacerse una aproximación con un número finito de fuentes, separadas unas de otras una distancia en torno a la mitad de la longitud onda de la máxima frecuencia a cancelar. Se obtienen valores de atenuación acústica importantes, de hasta 20 dB, incluso con sólo 6 fuentes secundarias [7].

### 2.3.3 Acoplamiento de fuentes acústicas

Como se comentó anteriormente, la interferencia destructiva de ondas de presión acústica, producidas por una fuente acústica de ruido, puede realizarse en todo el medio de propagación cuando se coloca otra fuente acústica de cancelación muy próxima a la fuente acústica de ruido. En este caso, la cancelación acústica puede percibirse en todo el espacio tridimensional. Este fenómeno se produce cuando la fuente secundaria emite una réplica del ruido original, de la misma amplitud y desfasada 180 grados.

La atenuación que se produce depende de la distancia entre las fuentes, es decir para distancias muy próximas es mucho mayor que para distancias mayores. En la Figura 13 se observan los frentes de onda producidos en función de la separación entre las dos fuentes.

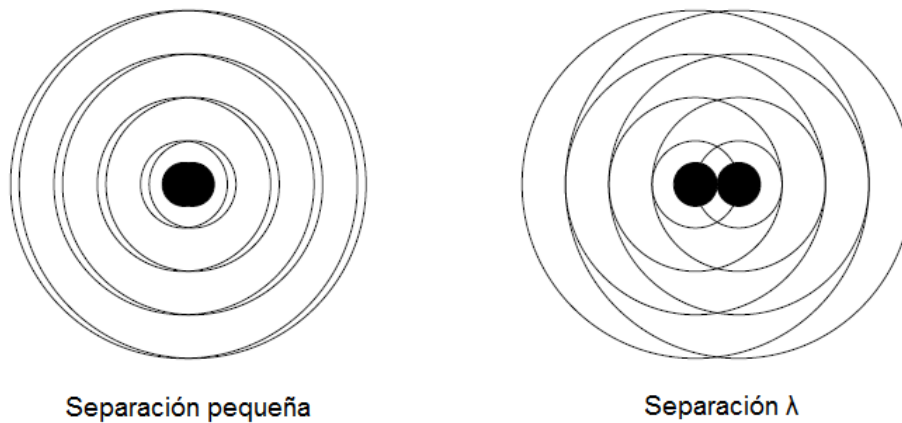


Figura 13. Atenuación acústica en función de la distancia entre las fuentes.

En la Figura 14 se puede comprobar que a mayor distancia entre las fuentes, menor es la reducción de potencia acústica.

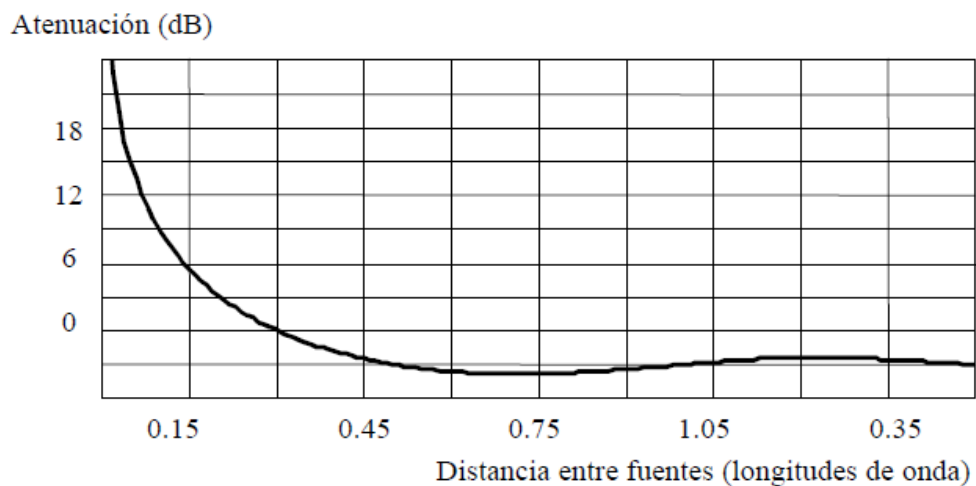


Figura 14. Disminución de la potencia acústica en función de la distancia entre las fuentes.

Es importante destacar que la disminución de la potencia acústica radiada sólo es realmente significativa para una separación de las fuentes inferior a una décima parte de la longitud de onda radiada. Para una frecuencia de 100 Hz la longitud de onda es 3.4 m, es decir, una separación de unos 34 cm (décima parte). Para una frecuencia de 5 kHz esta separación es de sólo 0.68 cm. Esto indica que realmente el margen de frecuencias de

trabajo va a ser muy bajo, generalmente hasta los 500 Hz. Como se comentó anteriormente, este es el margen de frecuencias donde las técnicas pasivas de control pierden efectividad. Ambas técnicas han de complementarse en una implementación eficaz de control.

### **2.3.4 Control activo en recintos**

En un recinto, como por ejemplo en un coche o en avión, el campo acústico está formado por las múltiples reflexiones de las ondas acústicas, producidas por las paredes del mismo. Estas reflexiones crean ondas estacionarias a ciertas frecuencias, los llamados modos propios del recinto. La energía acústica potencial del recinto puede calcularse como la raíz cuadrada de la suma de cada uno de los niveles de presión de los modos propios [8].

Cuando se introduce en el recinto una fuente acústica tonal, llamada fuente primaria, se “despiertan” los modos propios del recinto. Se coloca una segunda fuente acústica de la misma frecuencia, fuente secundaria, para cancelar el ruido generado por la fuente primaria. Un sistema de control activo de ruido modificará la amplitud y fase de la fuente secundaria, para conseguir el mínimo valor de la energía acústica potencial. Idealmente, para realizar esta medida se necesitarían infinitos micrófonos situados en todos los puntos del recinto. Debido a que esto no se puede realizar en la práctica, se utilizan habitualmente sólo unos micrófonos que nos den información de los modos propios del recinto.

Los resultados experimentales de esta forma de control activo de ruido acústico muestran que, cuando la frecuencia del ruido es inferior a la frecuencia del primer modo propio dominante, se consiguen importantes reducciones de energía acústica del recinto. En cambio, cuando la frecuencia del ruido aumenta y este valor se encuentra entre dos modos propios, la reducción acústica prácticamente desaparece. Esto es debido a que la fuente secundaria empieza a “despertar” nuevos modos propios; es decir, la densidad de modos propios crece con la frecuencia del ruido.

La única forma de control activo de ruido en un recinto para altas frecuencias es la modificación del coeficiente de absorción del recinto. Esto puede conseguirse colocando las fuentes secundarias en las esquinas y modificar la amplitud y fase de las mismas, para conseguir que absorban la potencia acústica radiada por la fuente primaria [9].

## **2.4 Tipos de ruido**

Los ruidos acústicos que van a ser objeto de atenuación se pueden dividir entre aquellos que tienen componentes periódicas, ruidos de banda estrecha, y aquellos que tienen un carácter aleatorio, ruidos de banda ancha. El margen de frecuencias de interés en

el control activo de ruido es sólo hasta los 500 Hz. Para frecuencias mayores, las zonas de cancelación acústica son muy pequeñas y no resulta práctico el control.

Entre los ruidos de banda estrecha se encuentran todos aquellos producidos por elementos mecánicos que tienen algún tipo de funcionamiento cíclico. Estos ruidos presentan una frecuencia fundamental de funcionamiento y unos armónicos asociados, múltiplos de la frecuencia fundamental, como por ejemplo el ruido de los ventiladores (frecuencia fundamental igual al número de palas de la hélice multiplicado por las revoluciones por segundo), el ruido de motor de un coche, ruido de los motores de un avión, ruido de las hélices de un helicóptero o de un avión, ruido de aire acondicionado. Entre los ruidos de banda ancha, con un nivel espectral importante en todo el margen de frecuencias, se encuentran por ejemplo el ruido que produce el viento contra el fuselaje de un avión o contra la carrocería de un automóvil, el ruido de rodadura en un coche, las turbulencias de aire en conductos de aire acondicionado.

Los sistemas de control activo de ruido no producen las mismas atenuaciones para ambos tipos de ruido. Siempre es más fácil atenuar los ruidos de banda estrecha que los ruidos de banda ancha. En los ruidos periódicos se obtienen fácilmente atenuaciones por encima de los 25 dB. El controlador realiza una igualación del nivel espectral del ruido. Cualquier componente que sobresale del nivel espectral medio, tonos y armónicos de las señales periódicas, los cancela fácilmente. Sin embargo, para los ruidos no periódicos las atenuaciones oscilan entre los 5 y los 15 dB, según la aplicación concreta. Además, el control para los ruidos de banda ancha ha de ser más preciso. El controlador ha de ser capaz de predecir la fase del ruido en la zona de cancelación, lo que supone obtener una referencia del ruido lo más cercana a su origen. Si no se cumple esta premisa (causalidad del controlador), no se puede conseguir atenuación alguna.

## 2.5 Entornos acústicos de cancelación

El ruido acústico puede ser cancelado teóricamente en cualquier punto del medio de transmisión donde se propagan las ondas de presión. Las dimensiones de cancelación acústica dependen del entorno acústico donde se produce dicha cancelación. Atendiendo a un punto de vista geométrico, las aplicaciones de los sistemas de control activo de ruido pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- **Cancelación acústica próxima a la fuente de ruido**

Esta situación suele ser la más efectiva para la cancelación del ruido. Suele utilizarse este escenario de control cuando la fuente de ruido está localizable y accesible. Si se coloca



una nueva fuente de ruido para cancelar a la original se reducen los niveles de presión acústica en todo el espacio tridimensional. Esta atenuación acústica es tanto mayor cuanto más fuentes canceladoras, fuentes secundarias, se sitúen en las proximidades de la fuente de ruido, y cuanto más cerca estén de esta [10].

En la Figura 15 se muestran las distintas curvas de atenuación en función del número de fuentes secundarias. Se pueden ver los niveles de atenuación acústica en función de la proximidad de las fuentes secundarias con respecto a la fuente de ruido. Las fuentes secundarias están equiespaciadas con respecto a la fuente puntual de ruido.

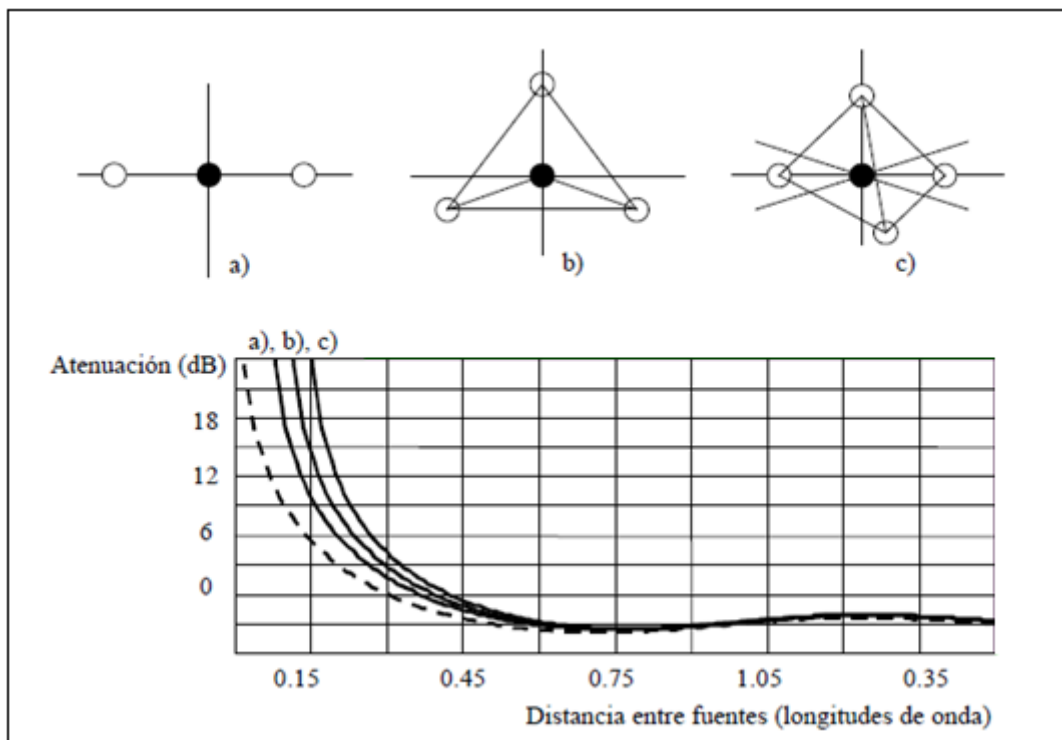


Figura 15. Reducción de la potencia acústica radiada por una fuente puntual en presencia de un array de fuentes secundarias

Como se puede observar, se obtienen valores importantes de cancelación a partir de tres fuentes situadas a una distancia inferior a la décima parte de la longitud de onda acústica.

- **Cancelación acústica en el interior de un conducto.**

Una gran parte de los trabajos realizados en control activo se han centrado en la cancelación acústica de ondas planas en el interior de un conducto (tuberías de calefacción, ventilación, aire acondicionado, conductos para la extracción de humos, tubos de escape de

automóviles, etc.). Los fundamentos de la cancelación acústica activa se remontan a Paul Lueg quien, como se comentó anteriormente, analizó la superposición de frentes de ondas planas en un tubo con el propósito de conseguir una interferencia destructiva del ruido en todo su camino de propagación. En la Figura 16 se muestra la idea propuesta por Paul Lueg.

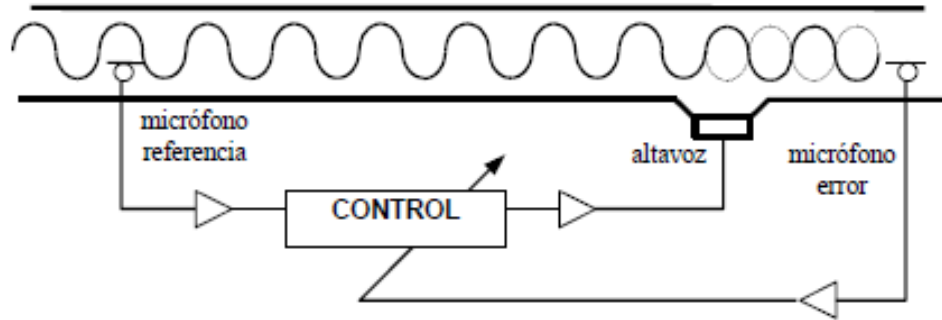


Figura 16. Configuración de un sistema de control activo de ruido en un conducto.

Un dispositivo de control, a partir de la señal  $x(n)$  recogida en un micrófono en el interior del conducto, genera una nueva señal  $y(n)$  ajustada en amplitud y fase, que al ser convertida en ondas de presión acústica por medio de un dispositivo electro-acústico (altavoz), produce por interferencia destructiva una cancelación acústica en el interior, a partir del punto donde se encuentra el altavoz y en el sentido de propagación de las ondas. Un micrófono (micrófono de error), situado a continuación del altavoz, entrega una señal eléctrica  $e(n)$  al controlador, para que este autoajuste el control y obtenga la mínima señal eléctrica del micrófono.

- **Cancelación acústica en recintos cerrados**

El campo acústico que se produce en el interior de un recinto cerrado está determinado por los modos propios del mismo. La existencia de superficies límite provoca la aparición de señales reflejadas que, junto con las señales incidentes, dan lugar a las denominadas ondas estacionarias. Cada onda estacionaria, o modo propio, se caracteriza por una frecuencia propia (también llamada frecuencia de resonancia) y, además, por una distribución de amplitudes de presión que dependen del punto del recinto considerado.

Las frecuencias de los modos propios de un recinto rectangular de dimensiones  $L_x$ ,  $L_y$ , y  $L_z$ , vienen dadas por la siguiente expresión:

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{n_x \pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{L_z}\right)^2} \quad (2)$$

donde  $n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, \dots$ , y “c” es la velocidad del sonido en el aire.

Un sistema de control activo de ruido intentará minimizar este parámetro mediante la emisión de nuevas ondas de presión acústica a través de fuentes acústicas secundarias (altavoces). Dependiendo del número de modos propios de la sala, en el margen de frecuencias a controlar, la atenuación será mayor o menor. Si sólo existe un modo propio dominante, a bajas frecuencias, se utiliza una única fuente secundaria para controlar este modo propio, pudiéndose alcanzar atenuaciones cercanas a los 20 dB. Si el margen de frecuencias contiene varios modos propios, frecuencias altas, es necesario utilizar varias fuentes secundarias. Cada fuente secundaria controla un determinado modo propio. Sin embargo, los resultados que se pueden obtener son bastante pobres, ya que es imposible cancelar un modo propio sin realzar los modos próximos. La única manera de disminuir la energía potencial acústica es incrementando el coeficiente de absorción del recinto mediante fuentes secundarias activas, situadas en las superficies del recinto, de manera que sean capaces de absorber energía acústica [11].

# **3**

## **Sistemas de control**



En este capítulo se da una introducción de los elementos que forman un sistema de control activo de ruido. Además, se estudian los diferentes sistemas de control: de lazo abierto (feedforward) o de lazo cerrado (feedback), y se analiza el tipo de configuración que se debería emplear dependiendo del tipo de ruido que se desea cancelar. Por último se presentan los distintos algoritmos de control, FIR e IIR, y sus principales ventajas e inconvenientes, y los algoritmos adaptativos utilizados en los sistemas de control: algoritmo adaptativo LMS, algoritmo adaptativo de entrada filtrada Filter-X LMS y algoritmo adaptativo genético.

### 3.1 Introducción

Para poder realizar una disminución de la presión acústica ruidosa en un recinto es necesario un sistema de control. Dicho sistema de control está formado por los siguientes elementos:

- **Sensores:** Micrófonos, acelerómetros u otros dispositivos que permitan obtener señales de referencia de las ondas de presión acústica a cancelar.
- **Actuadores:** Dispositivos electroacústicos a través de los cuales se modifica el campo acústico con el fin de obtener una disminución de la presión acústica. Suelen ser altavoces y actuadores piezoeléctricos.
- **Planta:** Es el campo acústico a controlar. Ejemplos clásicos son: el entorno ruidoso en el oído (auricular activo de protección auditiva), la propagación de ondas planas en el interior de un conducto de aire acondicionado, el ruido en el interior de un automóvil, etc.
- **Controlador:** Sistema electrónico que procesa las señales de los sensores y mediante algún conocimiento previo de la planta, genera la señal que será transformada en ondas de presión acústica por los actuadores.

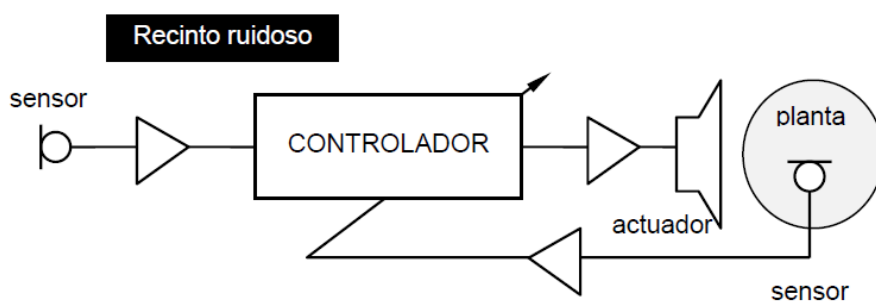


Figura 17. Elementos de un sistema de control activo de ruido acústico.

La atenuación del ruido está limitada por una serie de problemas que hay que tener en cuenta. En primer lugar, los transductores electroacústicos no son ideales y sus imperfecciones modifican la conversión electro/mecánica/acústica que se realiza en el sistema de control. Las características de los elementos de un sistema de control activo de ruido, enumeradas a continuación, determinan el funcionamiento óptimo del sistema.

*Sensores.* Los dispositivos clásicos son micrófonos y acelerómetros. Como obviamente no son dispositivos ideales, las referencias del campo acústico sufren algún tipo de degradación (distorsión, ruido, modificación espectral en realce o atenuación, etc.). Esta degradación influye en el funcionamiento óptimo del controlador. Las características de los sensores han de ser excelentes en el margen de frecuencias de interés ( $< 1000$  Hz es más que suficiente) en términos de sensibilidad, bajo ruido, respuesta en frecuencia y fase. Por ejemplo, en la mayoría de las aplicaciones los micrófonos que se utilizan son de bajo coste, tipo *electret*, ya que sus características son más que suficientes para lograr una buena referencia. La correlación entre el campo acústico y las señales eléctricas de los sensores determina la máxima atenuación que puede alcanzarse.

*Actuadores.* Los dispositivos electroacústicos que suelen utilizarse, como ya se ha indicado anteriormente, son altavoces y actuadores piezoeléctricos en estructuras ligeras. Inicialmente, el principal problema de estos dispositivos era su falta de robustez ante las posibles condiciones adversas de funcionamiento. Sin embargo, hoy en día existen dispositivos actuadores que trabajan de forma continua en aplicaciones reales, como los altavoces utilizados en el control activo de ruido en conductos de aire acondicionado y en los tubos de escape de automóviles. La no linealidad de los transductores actuadores genera distorsión y por tanto, la emisión de señales no deseadas (armónicos), no sujetos al control, provocando de esta manera la aparición de un nuevo ruido en el sistema. Los actuadores han de tener una respuesta lineal en el margen de frecuencia de interés ( $< 1000$  Hz).

*Planta (medio acústico).* El entorno acústico de cancelación también condiciona la dimensión máxima de la zona de atenuación. Ya se ha visto anteriormente los fundamentos físico-acústicos del control activo de ruido. Si el sistema a controlar es un sistema donde se propagan ondas acústicas planas, por ejemplo en un tubo, se obtienen resultados bastante buenos de cancelación en grandes distancias. Sin embargo, para el caso de ondas acústicas esféricas se reduce drásticamente la zona de control, a unos márgenes en torno a la décima parte de la longitud de la onda acústica, entre 7 y 34 cm para frecuencias entre 500 y 100 Hz respectivamente.

*Controlador:* El diseño de los controladores es bastante complejo ya que han de ser capaces de seguir los cambios acústicos que se puedan producir a lo largo del tiempo (nivel, frecuencia, fase, función de transferencia acústica del recinto, etc.). Por ejemplo, el ruido en el interior de un automóvil experimenta condiciones cambiantes constantemente. Toda esta variabilidad ha de ser seguida por el controlador para conseguir una réplica exacta invertida en fase y conseguir la máxima atenuación posible.

La implementación de un controlador con tales exigencias sólo es posible mediante algoritmos digitales adaptativos [12], desarrollados sobre un procesador digital de señal. En estos dispositivos se puede implementar cualquier sistema, por complejo que este sea, y además modificando sus características dinámicamente. Estas exigencias son impensables en sistemas analógicos clásicos, y fue esta la razón por la que los pioneros en el control activo de ruido desistieron de su implementación práctica. En los años 80 del siglo pasado, se desarrolló la tecnología de los procesadores digitales de señal (DSP) y su gran demanda hizo que los precios de los mismos disminuyeran drásticamente.

Existen dos tipos de control, control de lazo cerrado (*feedback*) y control de lazo abierto (*feedforward*). Ambos pueden aplicarse en un diseño de control activo de ruido. El primero de ellos sólo cancela ruido periódico y el segundo cancela tanto ruido de banda estrecha, periódico, como ruido de banda ancha, aleatorio. La propia configuración del sistema de control determina la capacidad de control del sistema.

## **3.2 Control tipo lazo cerrado (feedback)**

Las configuraciones de lazo cerrado se aplican en situaciones donde no es posible conseguir una referencia del ruido a cancelar.

Este tipo de control aplicado al control activo de ruido fue propuesto en los años 50 [13] para producir una reducción de la presión acústica alrededor de los reposacabezas de los asientos de los pasajeros en los aviones.



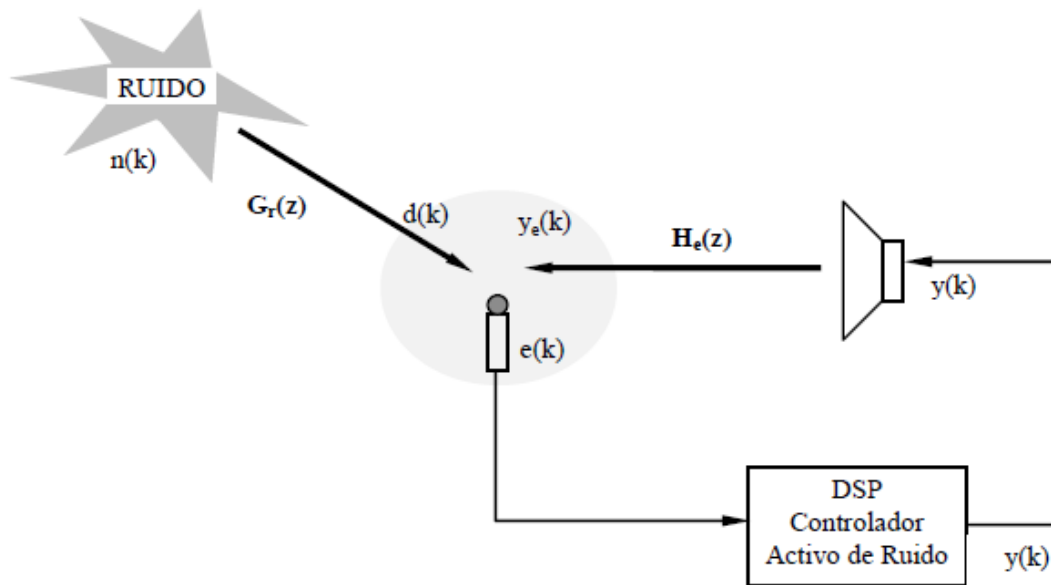


Figura 18. Sistema de control activo de ruido tipo feedback.

La señal que recoge el micrófono, señal de error  $e(k)$ , es la suma del ruido inicial  $d(k)$ , con el ruido de cancelación  $y_e(k)$ , generado por el altavoz. La señal de error sirve al controlador para modificar su respuesta  $y(k)$ , con objeto de conseguir que el valor eficaz de la señal de error  $e(k)$  sea mínima; es decir, que la presión acústica en el entorno del micrófono sea nula.

El sistema está sujeto a inestabilidades y el lazo de realimentación puede oscilar a partir de una determinada frecuencia [14], siendo necesario introducir en el sistema filtros compensadores que impidan esta realimentación positiva. El funcionamiento es tanto más estable cuanto menos retardo exista entre altavoz y micrófono, es decir, en situaciones en las que la zona de silencio se encuentra prácticamente en las proximidades del altavoz. Una aplicación basada en este tipo de control es la cancelación de ruido acústico con auriculares activos de protección auditiva. Altavoz y micrófono están en contacto con la oreja, en cuyo entorno se desea disminuir el ruido [15]. Estos auriculares son mucho más ligeros que los clásicos protectores pasivos y ya se comercializan a un precio asequible.

El sistema de control mostrado en la Figura 18, puede representarse mediante un diagrama de bloques con todas las funciones de transferencia electro/acústicas involucradas (Figura 19). El análisis de dicho diagrama de bloques permite obtener la función de transferencia que tiene que tener el controlador.

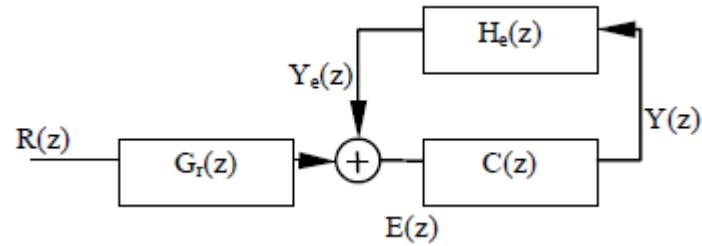


Figura 19. Diagrama de bloques de un sistema de control activo de ruido de lazo cerrado.

El sistema de lazo cerrado anterior se puede convertir en un sistema de lazo abierto, libre de posibles oscilaciones [16]. Esto se logra estimando la función de transferencia  $H_e(z)$  (Figura 20), es decir, la función de transferencia electro-acústica altavoz-camino-micrófono. Con esta variante, el problema de la realimentación positiva en los auriculares activos de protección auditiva desaparece [17].

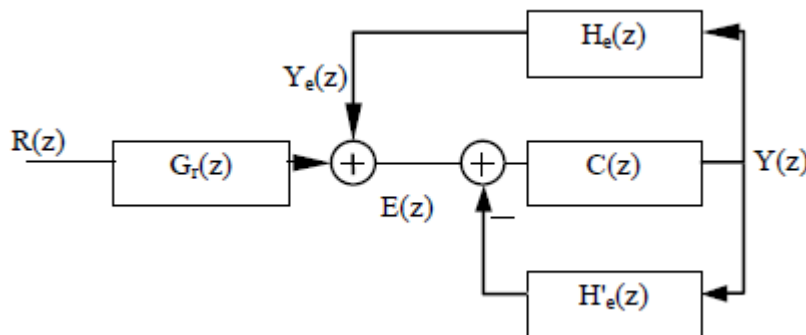


Figura 20. Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado transformado en un sistema de control de lazo abierto.

### 3.3 Control tipo lazo abierto (feedforward)

Cuando se dispone de una señal que nos da una referencia del ruido que se desea cancelar, la estructura de control cambia a una de lazo abierto como se muestra en la Figura 21.

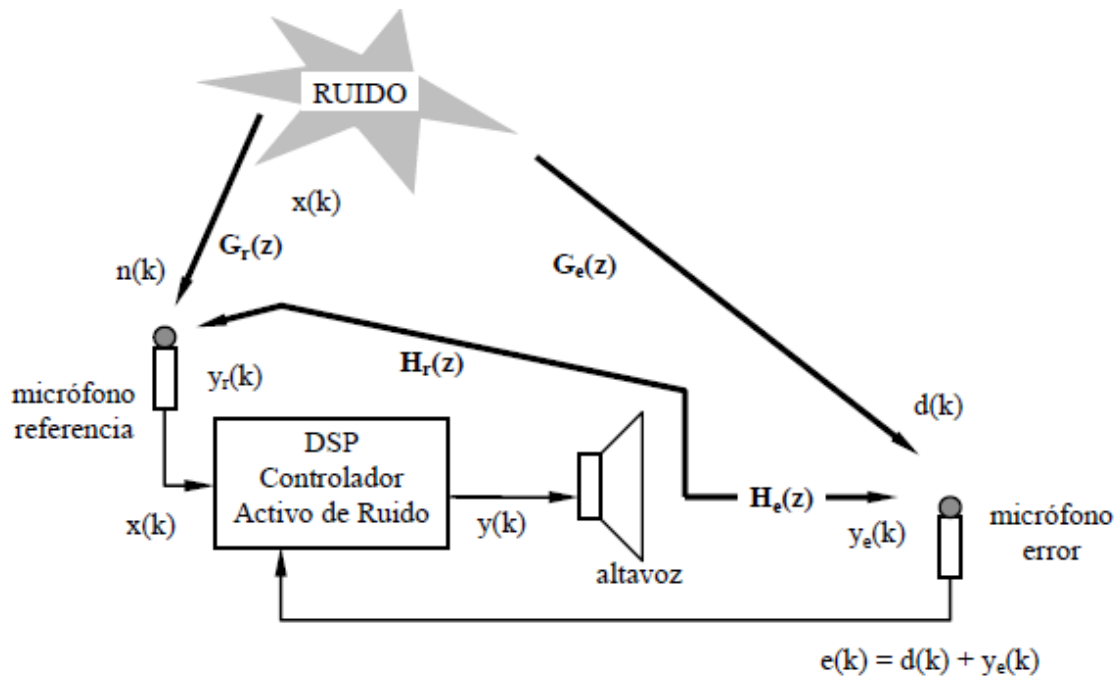


Figura 21. Sistema de control activo de ruido tipo feedforward.

A partir de una referencia del ruido  $x(k)$ , el controlador genera una señal de salida  $y_e(k)$ , idéntica pero cambiada en fase a la señal que llega al micrófono de error  $d(k)$ , procedente de la fuente de ruido. De esta forma, se consigue una disminución de la presión acústica en el entorno de este micrófono. Las variaciones acústicas del medio perturban la función de transferencia del sistema de control. Cuando las condiciones acústicas cambian hay que modificar la respuesta del controlador. Es imprescindible dar información al controlador de la señal de error  $e(k)$ , para que este modifique su respuesta cuando cambien las condiciones de la planta. De esta forma, el controlador intentará en todo momento hacer nula la señal que se recoge por el micrófono de error, esto es, el nivel de presión sonora en el entorno del micrófono. El sistema recibe el nombre de sistema adaptativo de control de lazo abierto (feedforward) y fue propuesto por Lueg [18] para la cancelación de ondas planas en el interior de un conducto.

El sistema anterior de control, mostrado en la Figura 21, puede representarse mediante un diagrama de bloques con todas las funciones de transferencia electro/acústicas involucradas (Figura 22). El análisis de dicho diagrama de bloques permite obtener la función de transferencia que tiene que tener el controlador.

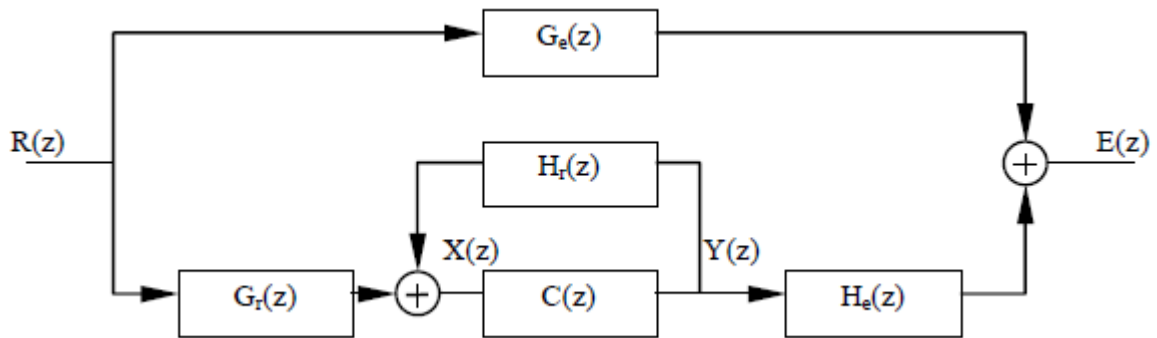


Figura 22. Diagrama de bloques de un sistema de control activo de ruido de lazo abierto.

Existen algunas limitaciones en el funcionamiento del sistema mostrado anteriormente. En primer lugar, la posible **realimentación acústica**. Puede observarse en la Figura 21 que las ondas de presión acústica, las cuales son emitidas por el altavoz para cancelar el ruido en el micrófono de error, pueden realimentarse en el sistema a través del micrófono de referencia. La función de transferencia que liga la señal de salida del altavoz  $y(k)$ , con la señal que recibe el micrófono de referencia  $y_r(k)$ , está representada por  $H_r(z)$ . Esta realimentación hace que la referencia del ruido  $n(k)$  quede algo enmascarada, por lo que el controlador no funciona correctamente. La atenuación acústica que se consigue es inferior a aquella que se logra cuando no existe realimentación acústica. Este problema se puede solventar si se utilizan micrófonos y altavoces directivos, o cuando sea posible, cambiando el micrófono de referencia por otro sensor, por ejemplo utilizando un acelerómetro, colocado directamente sobre la fuente de ruido.

Otra circunstancia a tener en cuenta es la **causalidad del sistema**. El controlador ha de cambiar la fase y la amplitud de la señal de referencia, para hacerla coincidir en oposición de fase con la señal de ruido, que recoge inicialmente el micrófono de error. Atenuará o amplificará la señal de entrada  $x(k)$  para modificar la amplitud al valor deseado y cambiará la fase de la misma mediante retardos. Estos retardos pueden ser variables dinámicamente en función de las posibles variaciones acústicas.

El retardo máximo que puede aplicar el controlador determina el funcionamiento global del sistema de control. Si se observa la figura anterior, hay tres funciones de transferencias involucradas (retardos acústicos):  $G_e(z)$ ,  $G_r(z)$  y  $H_e(z)$ . La primera función de transferencia es el retardo de propagación entre la fuente de ruido y el micrófono de error. La segunda función de transferencia es el retardo entre la fuente de ruido y el

micrófono de referencia.  $H_e(z)$  es el retardo que existe entre el altavoz y el micrófono de error. Para que controlador pueda ser causal, es decir, aplicar el retardo adecuado para cambiar la fase de la señal, se ha de cumplir la condición siguiente:

$$\text{retardo } G_e(z) \geq \text{retardo } G_r(z) + H_e(z) \quad (3)$$

Esto quiere decir que el sensor (micrófono) de referencia ha de estar más cerca de la fuente de ruido que el micrófono de error. Siempre que se pueda, se ha de situar el micrófono sobre la misma fuente, por ejemplo con un acelerómetro que recoja directamente las vibraciones de la fuente. El retardo que aplica el controlador hará que se iguale la anterior inecuación, de forma que sea ahora:

$$\text{retardo } G_e(z) = [\text{retardo } G_r(z) + \text{retardo controlador} + \text{retardo } H_e(z)] \quad (4)$$

El sistema funciona correctamente bajo estas circunstancias para cualquier tipo de ruido, de banda estrecha (periódico) y de banda ancha (aleatorio). La atenuación que se consigue para ruidos de banda ancha siempre es menor que para ruidos de banda estrecha. Para los ruidos de banda ancha, se suelen conseguir atenuaciones entre 5 y 15 dB, dependiendo de las aplicaciones concretas. En ruidos periódicos, la cancelación es bastante mayor, se supera con facilidad los 30 dB.

Si no se cumple la inecuación (3) el sistema no atenúa los ruidos aleatorios o de banda ancha. Es decir, el controlador no puede predecir la señal correspondiente  $y_e(k)$  que anula a  $d(k)$ . Sin embargo, las señales periódicas siguen siendo atenuadas de forma óptima. Estas señales repiten la forma de onda, periodo a periodo, y el controlador siempre puede realizar el retardo correspondiente, para conseguir hacer mínimo el valor eficaz de la señal de error  $e(k)$ .

### 3.4 Algoritmos de control

El controlador ha de ser capaz de seguir todas las posibles variaciones del campo acústico que puedan producirse (variaciones de fase, de frecuencia, de amplitud, de funciones de transferencia electro-acústicas, etc.). Podría pensarse en el diseño de un controlador analógico. Sin embargo, los sistemas analógicos no ofrecen todas las prestaciones de funcionamiento que se les exige a estos sistemas de control tan complejos. El diseño ha de realizarse desde el punto de vista digital, digitalizando las señales analógicas que nos entregan los sensores. Los datos numéricos que representan dichas señales analógicas, pasan por algoritmos digitales, sistemas

discretos, cuya función de transferencia sirve para corregir la fase y la amplitud de la señal de entrada, y así poder cancelar la señal de error del micrófono del mismo nombre. Estos datos, modificados por el sistema discreto, se convierten de nuevo en señales analógicas que, por medio de actuadores electroacústicos, se transforman en ondas de presión acústica, las cuales anulan por interferencia destructiva el ruido acústico inicial.

Los elementos que constituyen el controlador digital son los que se muestran en la Figura 23. En la etapa de entrada se tiene un filtro paso bajo anti-aliasing y el convertidor analógico-digital. En la etapa de salida se encuentra en el convertidor digital-analógico y el filtro paso bajo de salida anti-imagen. El sistema digital lo constituye un filtro digital, algoritmo numérico, cuyos parámetros son actualizados dinámicamente por medio de un algoritmo adaptativo, de manera que siga cualquier variación de las condiciones acústicas del sistema.

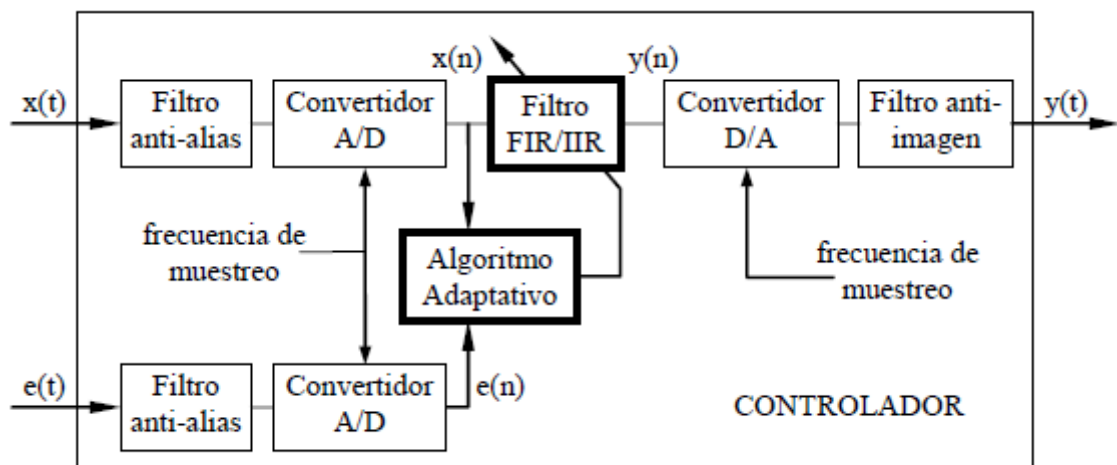


Figura 23. Elementos de un sistema digital de control activo de ruido.

Las señales analógicas de los sensores, micrófonos de error y de referencia, se muestrean a una frecuencia de muestreo bastante superior a la frecuencia Nyquist. Generalmente la máxima frecuencia de interés es 500 Hz y suele escogerse una frecuencia de muestreo 10 veces este valor,  $f_s = 5000$  Hz. Es decir, las muestras/datos de las señales de entrada se toman cada  $1/f_s$  segundos (retardo entre datos). El filtro anti-aliasing tiene una frecuencia de corte algo inferior a la mitad de la frecuencia de muestreo. El valor de esta frecuencia de corte se elige entre 1000 y 2500 Hz. Obviamente, estos valores son los mismos en la etapa de salida y así reconstruir nuevamente los datos en señales analógicas.

El funcionamiento del controlador está basado en los algoritmos FIR e IIR adaptativos.

### 3.4.1 Filtro FIR

Filtro de respuesta finita al impulso, lo que significa que si la entrada del filtro es un impulso, la salida de este será un número limitado de términos no nulos. Este tipo de filtro es estable debido a que su función de transferencia (transformada Z) sólo presenta ceros (plano Z), salvo los polos en el origen (que no afectan a la estabilidad), es decir, únicamente tendrá elementos en el numerador de la función de transferencia.

Los datos de entrada pasan por el sistema discreto FIR que aplica a los datos  $x(n)$  una determinada función de transferencia, obteniendo unos nuevos datos  $y(n)$ .

$$y(n) = \sum_{k=0}^M c(k) x(n - k) \quad (5)$$

Los datos conforme se van digitalizando, al ritmo marcado por la frecuencia de muestreo, se van almacenando en una zona de memoria del microprocesador (DSP). Esta tabla de memoria se renueva constantemente con la entrada de cada dato. Los datos de la tabla se desplazan una posición desechándose el dato más antiguo; el nuevo dato que acaba de llegar se coloca en la posición de memoria  $x(n)$ , como se muestra en la Figura 24. Después, los datos de la tabla se multiplican por unos coeficientes,  $c(k)$ , almacenados en otra tabla de datos y por último se suman todos los productos resultantes, obteniéndose de esta forma el dato de salida  $y(n)$ . Este proceso corresponde a un filtrado digital tipo FIR, cuya función de transferencia está determinada por los valores de los coeficientes  $c(k)$ .

Cualquier función de transferencia analógica puede modelarse mediante un filtro FIR. Los parámetros que determinan la similitud de la misma dependen de los valores  $c(k)$  y de su número (posiciones de memoria). Cuantos más coeficientes mejor aproximación.

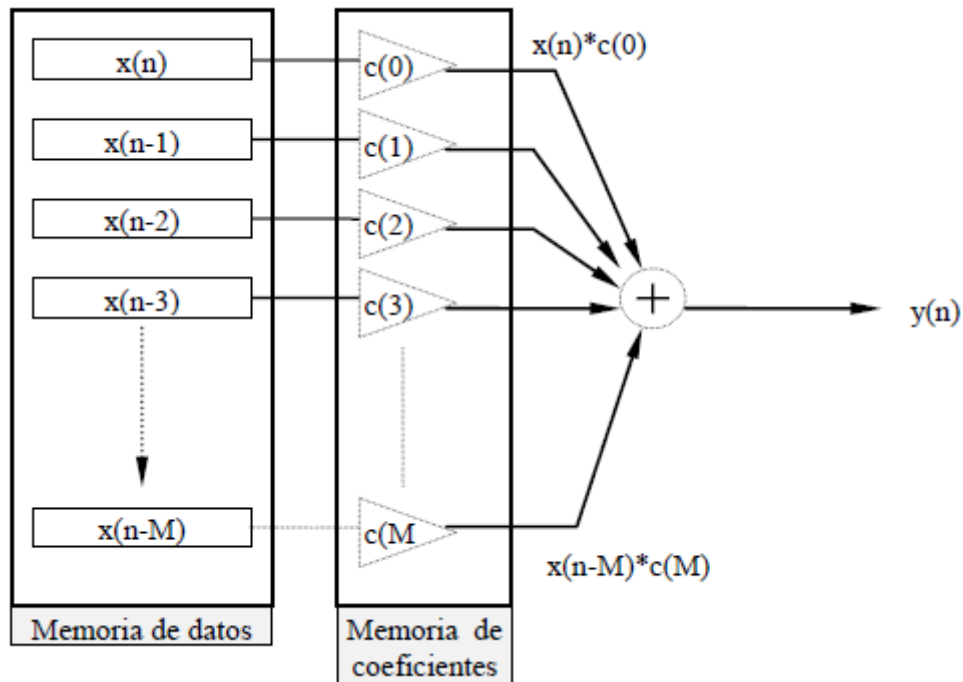


Figura 24. Estructura de un filtro digital tipo FIR.

El número de coeficientes  $M$ , determina el máximo retardo que puede aplicar el filtro FIR a los datos de entrada  $x(n)$ . El retardo máximo, dado en segundos, que puede aplicar un filtro FIR a unos datos de entrada  $x(n)$ , es el número de coeficientes del filtro  $M$  dividido por la frecuencia de muestreo. Por tanto, este parámetro  $M$  será un factor importante en el diseño del controlador. Por ejemplo, si estamos muestreando a 5000 Hz y se estima necesario que el controlador sea capaz de realizar cambios de fase equivalentes a 10 msg, entonces el número mínimo de coeficientes del filtro será, según se mostró en la ecuación (4):

$$M = 10^{-2} \cdot fs = 0.01 \cdot 5000 = 50 \text{ coeficientes}$$

Para variar la amplitud de la señal y hacerla coincidir exactamente con la amplitud de la señal del ruido, el filtro simplemente realiza un escalado de los valores de los coeficientes  $c(k)$ , atenuándolos o realzándolos.

### 3.4.2 Filtro IIR

Filtro digital de respuesta infinita al impulso. Si la entrada es un impulso, como salida se tendrá un número ilimitado de términos no nulos, es decir, nunca volverá a un estado de reposo. Para obtener la salida se emplean valores de la entrada actuales y anteriores, además de realimentar algunos valores de la salida.



Este tipo de filtro necesita menos coeficientes que el filtro FIR. Este parámetro puede ser importante cuando se manejan retardos demasiado grandes. En tal caso, suele utilizarse estructuras basadas en filtrado IIR. La diferencia con respecto al filtrado FIR es que los datos de salida se guardan en otra tabla de datos y son multiplicados por una nueva tabla de coeficientes según se muestra en la Figura 25.

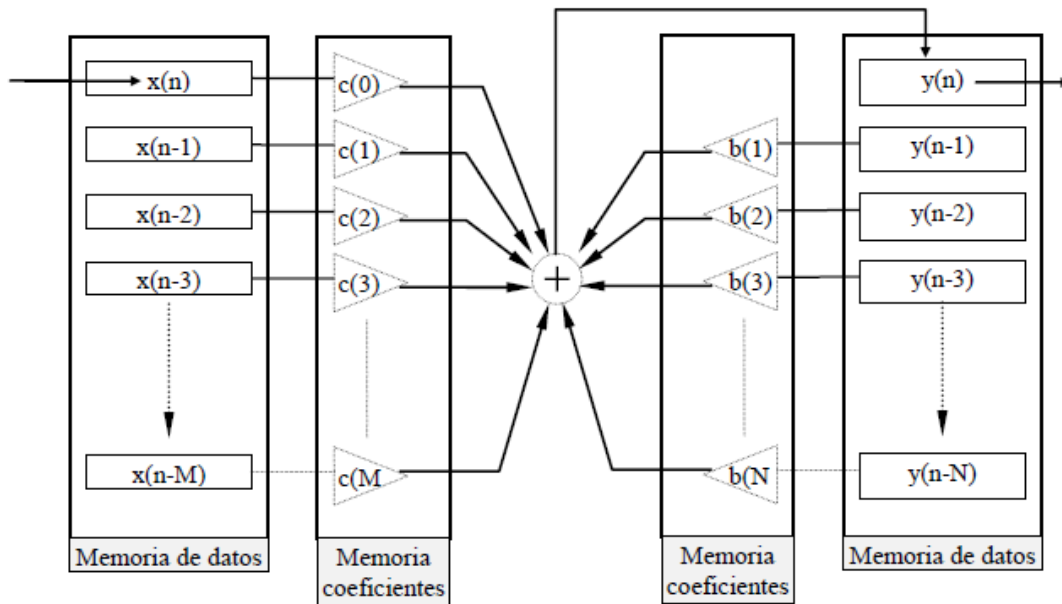


Figura 25. Estructura de un filtro digital tipo IIR.

El algoritmo de cálculo que realiza un filtro IIR obedece a la expresión:

$$y(n) = \sum_{k=0}^M c(k) \cdot x(n-k) + \sum_{k=1}^N b(k) \cdot y(n-k) \quad (6)$$

De esta forma, los datos de salida se realimentan en el algoritmo de cálculo por medio de los coeficientes de realimentación  $b(k)$ . El filtrado IIR suele utilizarse para eliminar la realimentación acústica que puede presentarse en un sistema de control de lazo abierto. Los coeficientes  $b(k)$  del filtro se encargan de anular esta realimentación acústica. Un problema muy importante que presentan los filtros IIR es su potencial inestabilidad. Este factor es el que hace que su utilización no sea demasiado corriente en los sistemas de control activo de ruido. Siempre se prefiere anular la realimentación por métodos electroacústicos, micrófonos y altavoces directivos, o acelerómetros situados directamente sobre la fuente de ruido.

#### Selección del tipo de filtro: FIR/IIR

La elección del tipo de filtro a utilizar en el controlador depende de las características de la aplicación de control activo de ruido, pero también de las características de los propios filtros:

- **Función del sistema:** un filtro FIR solo presenta polos en el origen. En cambio, los filtros IIR pueden tener sus polos y sus ceros en cualquier punto finito del plano  $z$ , lo que proporciona mayor flexibilidad en el diseño.
- **Estabilidad:** al tener únicamente polos en el origen, los filtros FIR son estables, mientras que los IIR puede ser inestables. La inestabilidad se debe a la realimentación de los datos de salida en el cálculo del algoritmo.
- **Linealidad:** los sistemas FIR pueden conseguir una característica de fase exactamente lineal, es decir, un retardo constante para todas las frecuencias, mientras que los IIR sólo se pueden aproximar a ella a costa de un gran aumento de la complejidad.
- **Memoria:** cualquier función de transferencia puede realizarse mediante un filtro FIR, pero siempre se necesitan muchos más coeficientes que con un filtro IIR. El número de coeficientes está directamente relacionado con el tiempo de procesamiento del procesador digital de señal (DPS), limitado por la frecuencia de muestreo. Por tanto, el grado de aproximación del filtro FIR está determinado por el número de operaciones que pueda realizar un determinado DPS en un tiempo igual al periodo de muestreo.

A modo de resumen, comparando los filtros IIR y los FIR, la ventaja de los filtros digitales IIR frente a los FIR es que normalmente requieren menores coeficientes para hacer operaciones similares de filtrado. Por lo tanto, los sistemas basados en filtros IIR se ejecutan más rápido y no requieren de memoria extra.

La desventaja de los filtros IIR es que la respuesta de fase es no lineal (producen en general distorsión de fase y son potencialmente inestables en configuraciones adaptativas de control). Se deben usar los filtros FIR para esas aplicaciones que requieran estabilidad y respuesta de fase lineal.

Los coeficientes óptimos de los sistemas FIR e IIR del controlador se calculan a través de algoritmos adaptativos que minimizan dinámicamente el nivel de la señal en el micrófono de error, el residuo final.

### 3.4.3 Algoritmos adaptativos

Para que la función de transferencia del controlador siga las variaciones que surgen en el entorno acústico de cancelación, tiene que ir variando el valor de los coeficientes  $c(k)$  del filtro. De esto se encarga el algoritmo adaptativo que se muestra en la Figura 26. El algoritmo adaptativo, a partir de la señal de entrada del sensor de referencia  $x(n)$  y una señal deseada  $d(n)$ , realiza los cálculos precisos para ir actualizando los coeficientes muestra a muestra, tal que la salida del filtro  $y(n)$  se parezca lo más posible a la señal deseada. Para conseguirlo, se calcula el error mediante la expresión (6), hasta conseguir minimizar el error lo máximo posible.

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (6)$$

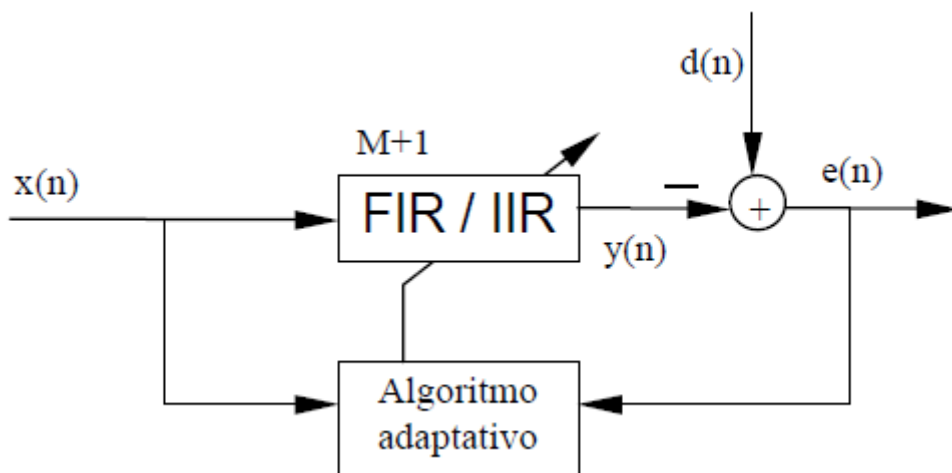


Figura 26. Configuración de un filtro adaptativo.

- **Algoritmo adaptativo LMS**

El algoritmo adaptativo que más se utiliza, debido a su simplicidad y prestaciones, es el algoritmo adaptativo LMS. Con una señal de entrada  $x(n)$ , el algoritmo adaptativo LMS cambia los coeficientes del filtro FIR para obtener una señal de salida  $y(n)$ , que se parezca lo más posible a la señal deseada  $d(n)$ . El nivel de la señal de error  $e(n)$  disminuirá siempre que exista alguna correlación entre la señal de entrada y la señal deseada. Si no ocurre esta premisa, los valores de los coeficientes del filtro FIR serán prácticamente nulos así como la salida  $y(n)$ .

La búsqueda de los coeficientes se realiza como se muestra a continuación:

Como se ha comentado anteriormente, la señal de error se calcula según la expresión (6), y la señal de salida del filtro FIR es:

$$y(n) = \sum_{k=0}^M c(k)x(n-k) \quad (7)$$

Por tanto, la expresión final será:

$$e(n) = d(n) - \sum_{k=0}^M c(k)x(n-k) \quad (8)$$

El error cuadrático instantáneo queda definido por:

$$e^2(n) = [d(n) - \sum_{k=0}^M c(k)x(n-k)]^2 \quad (9)$$

La búsqueda de cada uno de los coeficientes del filtro FIR se realiza según se muestra en la Figura 27.

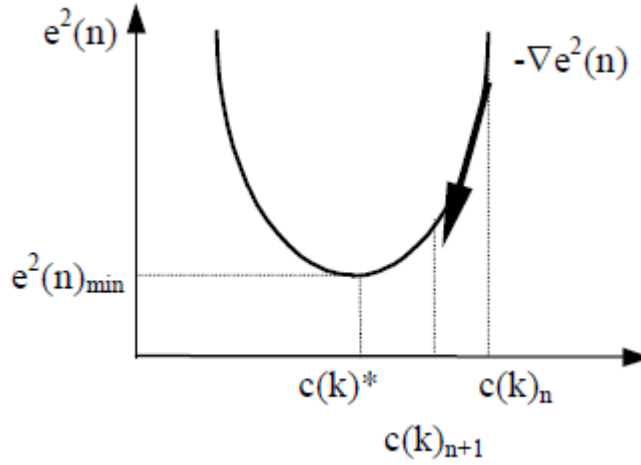


Figura 27. Gradiente de la superficie del error cuadrático instantáneo.

Los coeficientes  $c(k)$  se actualizan de forma iterativa por el método de la máxima pendiente:

$$c(k)_{n+1} = c(k)_n - \mu \nabla_{c(k)} e^2(n) \quad (10)$$

Es decir, los coeficientes en la iteración siguiente se calculan a partir de los valores de la iteración actual, menos el gradiente del error cuadrático instantáneo,  $e^2(n)$ , multiplicado por una constante  $\mu$ . El gradiente o la derivada del error cuadrático instantáneo, con respecto a cada uno de los coeficientes, tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial e(n)}{\partial c(k)} = \frac{\partial}{\partial c(k)} (d(n) - \sum_{k=0}^M c(k)x(n-k)) = -x(n-k) \quad (11)$$

La expresión final de actualización de los coeficientes según el algoritmo LMS es:

$$c(k)_{n+1} = c(k)_n + 2\mu e(n)x(n - k) \quad (12)$$

El parámetro  $\mu$  regula la velocidad de adaptación del sistema. Valores grandes del mismo significa una gran rapidez de adaptación a los cambios. Existe un valor umbral que no se debe superar para que la adaptación se realice de una forma estable. Por debajo de este umbral la rapidez de adaptación va ligada al ruido residual que no se elimina de la señal de error. De tal manera que para factores de convergencia bajos se tendrá una adaptación lenta, pero el residuo final será pequeño. Para factores de convergencia altos ocurrirá el caso contrario, rapidez de adaptación y residuos altos.

El algoritmo LMS se puede implementar en un filtro IIR, pero al hacerlo nos encontramos con dos problemas que se deben de tener en cuenta:

- Inestabilidad: como se comentó anteriormente, los polos del sistema pueden salir de la circunferencia de radio unidad y por lo tanto el filtro se hace inestable.
- La superficie de la señal de error presenta numerosos mínimos, lo cual puede provocar que el algoritmo pare la adaptación de los coeficientes en un mínimo que no sea el mínimo absoluto (mínimos locales).

- **Algoritmo adaptativo de entrada filtrada (Filtered-X LMS)**

Para garantizar la estabilidad del sistema, es necesario filtrar la señal de entrada (referencia) con la función de transferencia existente entre la señal de salida y la señal de error, dando lugar al algoritmo adaptativo de entrada filtrada.

Está basado en la estructura de filtrado adaptativo FIR LMS. En estas configuraciones, las señales  $d(n)$  y  $y(n)$  no son restadas directamente, sino que atraviesan una función de transferencia,  $H(z)$ .

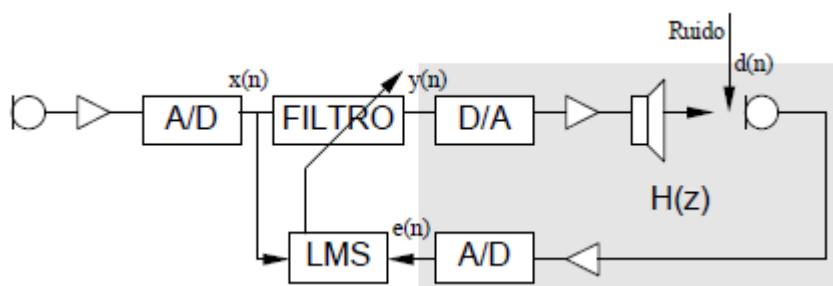


Figura 28. Configuración adaptativa del sistema de control activo de ruido.

Para que el algoritmo adaptativo converja a la solución óptima, se ha de conocer previamente la función de transferencia  $H(z)$  o una estimación de ella. Dado que la función de transferencia incluye altavoz, camino acústico y micrófono, las variaciones en las condiciones iniciales de este último hace necesario que se requiera una estimación dinámica de la función de transferencia, añadiendo complejidad a todo el sistema de control.

Existen otro tipo de algoritmos adaptativos que realizan la búsqueda de los coeficientes de los sistemas FIR/IIR de una forma aleatoria y además no necesitan estimar ninguna función de transferencia, los llamados algoritmos genéticos.

- **Algoritmos genéticos**

Los algoritmos adaptativos de los que se ha hablado hasta ahora buscaban los coeficientes óptimos de los filtros FIR o IIR mediante el método de máxima pendiente. Además, como se comentó, dada la configuración específica del sistema de control activo de ruido, estos algoritmos adaptativos también deben estimar la función de transferencia existente entre la señal de salida y la señal de error. Los errores de fase de más de  $90^\circ$  en la estimación de esta función de transferencia, provocan la inestabilidad del algoritmo adaptativo [19]. Este error de estimación puede ser insalvable cuando la función de transferencia a estimar es una función no lineal, debido a las no linealidades de los transductores electro-acústicos utilizados [20].

Los algoritmos genéticos pueden adaptar los coeficientes del filtro FIR o IIR para sistemas de control no lineales [21] y, además, realizan la búsqueda de los coeficientes de una forma aleatoria y no necesitan estimar funciones de transferencia de cancelación, es decir, funciones de transferencia entre las señales de salida y las señales de los sensores de error, lo que supone un gran ahorro de cálculo y de complejidad en el diseño de sistemas de control activo de ruido.

Los principios básicos de los algoritmos genéticos fueron establecidos por Holland (1975) y desarrollados por Goldberg [22] y De Jong [23].

Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos usados, generalmente, en problemas de búsqueda y optimización de parámetros. El procedimiento de búsqueda está basado en la selección natural biológica, es decir, simula el comportamiento evolutivo de los sistemas biológicos. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intervalo de información estructurado, pero aleatorizado.

Para alcanzar la solución a un problema se parte de un conjunto inicial de individuos o cromosomas (coeficientes), llamado población, generado de manera aleatoria. Cada uno

de estos individuos representa una posible solución al problema. Estos individuos evolucionarán tomando como base los esquemas propuestos por Darwin [24] sobre la selección natural, y se adaptarán en mayor medida tras el paso de cada generación a la solución requerida.

En general, constan de tres procesos: selección, cruzamiento y mutación, que realizan la transición entre la población de una generación y la población de la siguiente. El ciclo se muestra en la Figura 29.

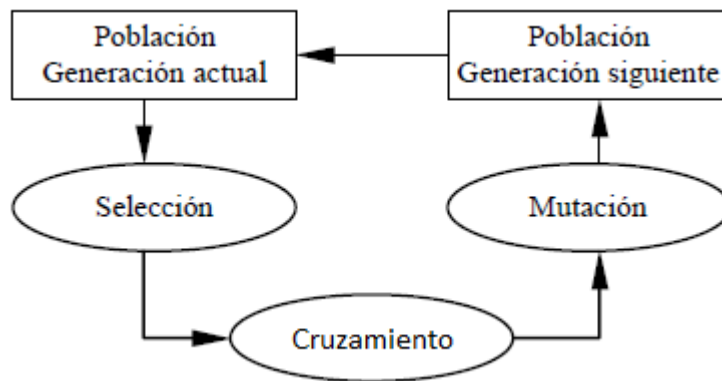


Figura 29. Ciclo del algoritmo genético.

En filtrado adaptativo, el algoritmo genético trabaja con una población de cromosomas (conjuntos de coeficientes de filtros FIR o IIR), dando un valor apto a cada cromosoma. El grado de aptitud del cromosoma “i” es inversamente proporcional al error cuadrático medio de la señal de error  $e(n)$  que se obtiene con el mismo:

$$\sigma_{e,i}^2 = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L e_i^2(n) \quad (13)$$

donde L es el número de muestras de la ventana de la señal de error sobre la que se estima su potencia, cuando los coeficientes del filtro corresponden al cromosoma “i”. En un principio, el algoritmo genético empieza con una población de cromosomas cuyos valores se asignan de forma aleatoria. En el proceso de selección, se buscan los cromosomas más aptos, es decir, aquellos que producen el menor error cuadrático medio. Entre estos cromosomas, se forman parejas (padres) de forma aleatoria para la reproducción, es decir, para la creación de nuevos cromosomas (cruzamiento). Por cada pareja de padres nacen dos nuevos hijos. Cada uno de estos nuevos cromosomas tiene información de cada uno de los padres, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 30. Cruce de cromosomas en el algoritmo genético.

Después de este proceso se produce la mutación de los hijos, es decir, se altera de forma aleatoria la información de los nuevos cromosomas.

Padre	1	1	1	1	1	1	1	1
Hijo	0	1	1	0	0	1	1	1

Figura 31. Mutación de cromosomas.

Esto se realiza añadiendo un pequeño ruido uniforme, de forma que se generen todos los posibles valores del espacio de búsqueda y pueda alcanzarse el mínimo global. Las mutaciones de los hijos permiten crear la población de cromosomas de la generación siguiente. Este proceso se repite una y otra vez, y la convergencia/adaptación del algoritmo se produce cuando los cromosomas se parecen cada vez más entre sí. El ajuste de los parámetros de trabajo (número de padres, probabilidad de cruce y de mutación, amplitud de la mutación, tamaño de las poblaciones, etc.), determina la velocidad y el residuo final del algoritmo adaptativo [25].

Los algoritmos genéticos presentan dos problemas:

- Gran cantidad de cómputo. El lenguaje utilizado para especificar soluciones candidatas debe ser robusto para ser capaz de tolerar cambios aleatorios que no produzcan constantemente errores o resultados erróneos.
- Velocidad de convergencia lenta. En filtrado IIR adaptativo, los algoritmos genéticos se sitúan en unas pocas generaciones en el entorno de mínimo global, pero una vez alcanzado este entorno su convergencia hacia el mínimo es bastante lenta, a diferencia de los algoritmos adaptativos basados en el método de la máxima pendiente.

Sin embargo, tienen las siguientes ventajas:



- Operan de forma simultánea con varias soluciones, en vez de trabajar de forma secuencial como las técnicas tradicionales. Es decir, las técnicas tradicionales sólo pueden explorar el espacio de soluciones en una única dirección al mismo tiempo, mientras que los algoritmos genéticos operan de forma simultánea con varias soluciones, cogiendo información de varios puntos del espacio y pudiendo desechar una solución si es menos óptima, y seguir por otros caminos.
- Cuando se usan para problemas de optimización, los mínimos locales (soluciones no óptimas) apenas si aparecen en el proceso de búsqueda, a diferencia de lo que ocurre en las técnicas basadas en el gradiente de error.

Los algoritmos genéticos se aplican sobre todo a estructuras tipo IIR para escapar de los mínimos locales. Llegan fácilmente al mínimo absoluto pero son bastante lentos y el residuo final es superior al de los algoritmos de búsqueda por gradiente. Estos problemas pueden solucionarse utilizando una búsqueda conjunta: genética para llegar a las inmediaciones del mínimo absoluto y por gradiente para aproximarnos de forma más precisa al mismo.

Como se comentó al principio del proyecto, el objetivo principal es la implementación de un sistema de control activo de ruido mediante algoritmos genéticos. Por tanto, en la parte práctica el funcionamiento del controlador está basado en algoritmos FIR adaptativos y el algoritmo que variará el valor de los coeficientes del filtro será un algoritmo genético.

Los motivos por los que se ha elegido un algoritmo tipo FIR y no IIR son los siguientes:

- Estabilidad: Los filtros FIR aseguran estabilidad. Esto no ocurre con los IIR.
- Linealidad: Los sistemas FIR pueden conseguir una característica de fase exactamente lineal, mientras que los IIR sólo se pueden aproximar a ella a costa de un gran aumento de su complejidad. La calidad de los dispositivos se valora en términos de linealidad (baja distorsión). Es imprescindible para obtener una señal eléctrica que represente fielmente las ondas de presión acústica que se recogen a través de micrófonos o que se generan a través de altavoces (en un margen de frecuencias no superior a 500 Hz). Cuando un dispositivo no es lineal genera armónicos no deseados de la señal. Un nivel elevado de los armónicos en los sensores electro-acústicos enmascara la señal eléctrica que debe procesar el controlador, llegando a impedir alcanzar el funcionamiento óptimo del mismo.

La parte negativa de usar este tipo de filtro está en el mayor número de coeficientes que requieren para hacer operaciones similares de filtrado, por lo que su ejecución es más lenta.

# **4**

## **Diseño del sistema de control activo de ruido**



Una vez expuesta la teoría, el siguiente paso es la implementación del código sobre el software de lenguaje de cálculo técnico MATLAB. En este capítulo se explican las fases por las que se ha pasado hasta conseguir una solución óptima de funcionamiento y el diseño realizado en dicho software.

## 4.1 Fases del proceso

En el software de cálculo se simula de una forma ideal, con señales generadas por el propio software de procesamiento de señal y con librerías de filtrado adaptativo ya implementadas en el mismo.

A modo de recuerdo, el objetivo de un sistema adaptativo, dada una señal de entrada  $x[n]$  y una señal deseada  $d[n]$ , es hallar los coeficientes de un filtro tal que su salida  $y[n]$  se parezca lo más posible a la señal deseada  $d[n]$ . Para conseguirlo se modifican los coeficientes del filtro para hacer que la diferencia entre ambas señales ( $d[n] - y[n]$ ), señal de error  $e[n]$ , sea mínima.

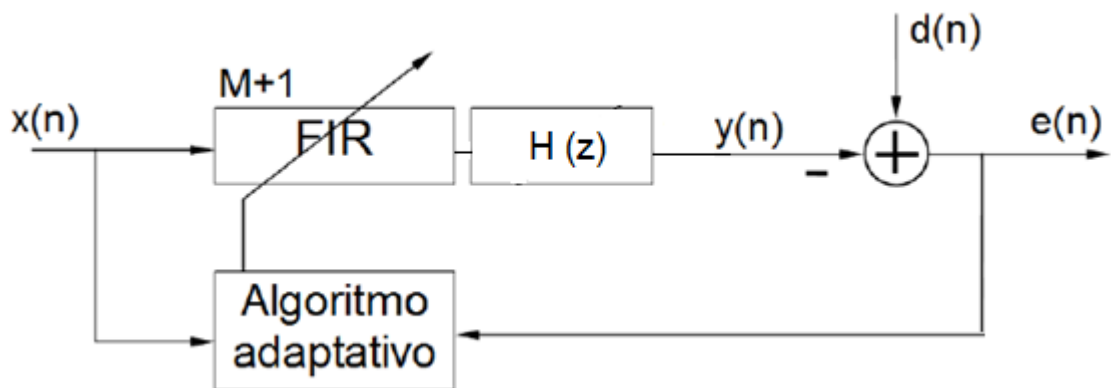


Figura 32. Esquema de un sistema de control activo de ruido.

En un algoritmo genético siempre se utiliza una función de evaluación, la cual hace que los mejores sobrevivan y evolucionen. Se parte de un conjunto (población) de posibles candidatos de coeficientes (cromosomas), creados de manera aleatoria. Se seleccionan aquellos que producen menor residuo (menor nivel de error), se cruzan entre sí (reproducción) y se mutan al mismo tiempo, para así producir una nueva generación de cromosomas y repetir de nuevo el proceso.

En la Figura 33 se muestra de forma gráfica cómo se realiza el proceso. (En este proyecto se han empleado filtros FIR, y no IIR).

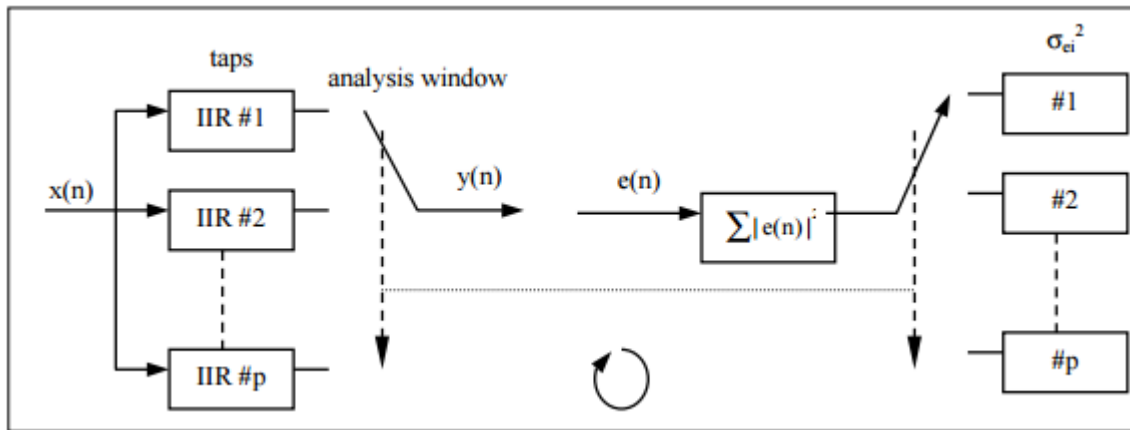


Figura 33. Diagrama de bloques de un algoritmo genético.

La señal  $x(n)$  es la señal de entrada creada de manera aleatoria. Tras ser filtrada y sumada posteriormente a la señal deseada (misma señal pero retardada), se obtiene el error cuadrático medio mediante la siguiente ecuación.

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} e^2(k) \quad (14)$$

Una vez obtenidos los errores, se selecciona el filtro que corresponde al menor de ellos, se reproducen y se mutan. Mediante este proceso se introducen cambios aleatoriamente de la secuencia genética, alterando los genes bajo un factor de probabilidad determinado. Dicha probabilidad es una variable del sistema y depende del usuario, de forma que se permite realizar búsquedas más objetivas hacia un tipo de características concretas.

## 4.2 Diseño en MATLAB

Este proceso se ha implementado en el software de cálculo MATLAB. Los datos de entrada y salida de dicha función son los siguientes:

- Señal de referencia:  $x$
- Señal deseada:  $d$
- Número de filtros genéticos: NFIR
- Longitud de los filtros (coeficientes, -cromosomas-): taps
- Vector de datos de la función de transferencia: H\_path.
- Valor de mutación de los filtros (en porcentaje): mutation
- Longitud de los bloques de datos: N
- Señal de error:  $e$  (salida)

Los pasos a seguir para implementar el código se muestran en la Figura 34.

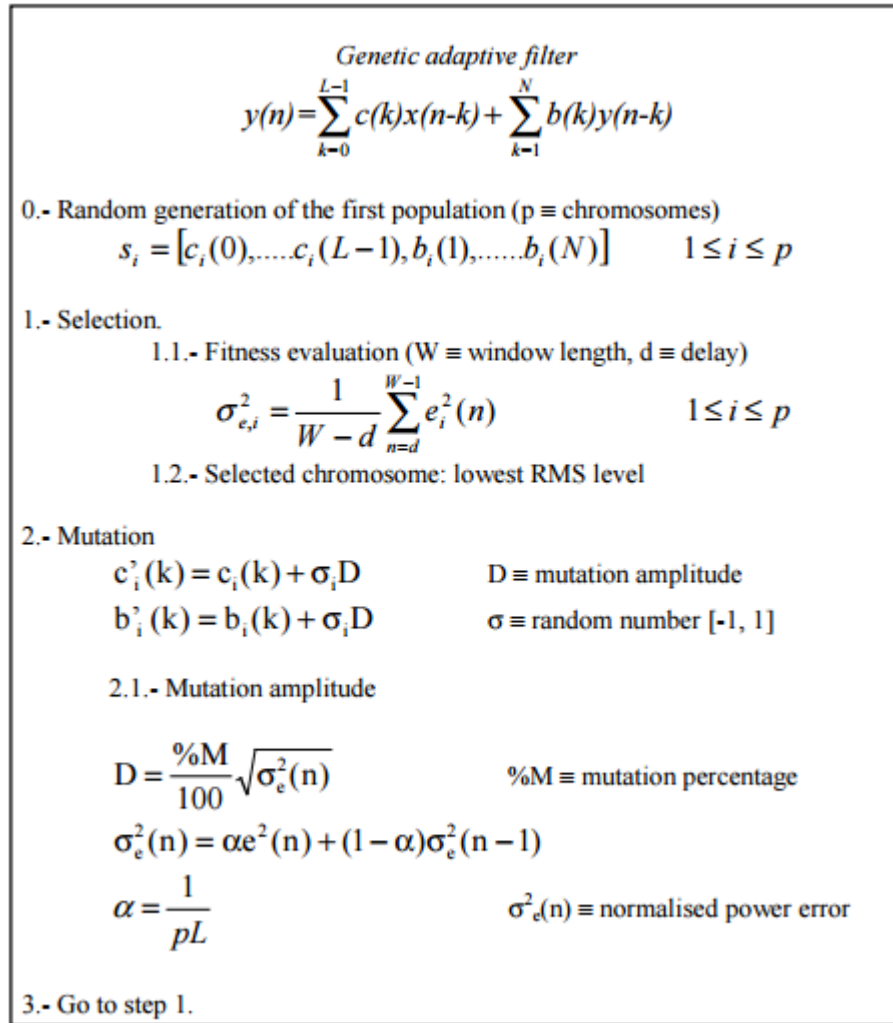


Figura 34. Secuencia de operaciones de un algoritmo genético.

El código implementado se muestra a continuación: (el detalle del algoritmo se encuentra en el artículo “A Simple Genetic Algorithm for Active Noise Control” [26]).

```
function [e] = genetic_anc(x,d,NFIR,taps,H_path,mutation,N)

iteraciones = floor(length(x)/N); %Número de bloques de datos de las
señales "x" y "d"(ventanas de N muestras)

H = mutation/100)*2*(rand(NFIR, taps)-0.5); %Inicialización de los
coeficientes. Matriz de NFIR x taps coeficientes

%Inicialización de vectores de datos
e=zeros(1,length(x)); %Señal de error
yy=zeros(1,length(x)); %Señal de salida del filtro genético
yyp=zeros(1,length(x)); %Señal de salida filtrada con H_path(z)

taps_path=length(H_path); %Longitud del filtro H_path(z)
```

```

Le=zeros(1,NFIR); %Variable para almacenar el nivel de la señal de error

Lx=zeros(1,NFIR); %Variable para almacenar el nivel de la señal de entrada

ESR=zeros(1,NFIR); %Variable para almacenar la relación entre niveles Le/Lx

minimos=[]; %Variable para comprobar los mínimos de los niveles

for i= 1:NFIR:iteraciones-NFIR %Lazo principal (Si NFIR=3, contador de 3
                               en 3)

    for j= 1:NFIR %Lazo para cada filtro genético (Si NFIR=3, 3
                iteraciones)

        xx = x(1+(i+j-2)*N:(i+j-1)*N); % Se toma una nueva ventana de N
                                         datos de la señal x (referencia)
        dd = d(1+(i+j-2)*N:(i+j-1)*N); % Se toma una nueva ventana de N
                                         datos de la señal d (deseada)

        yy(1+(i+j-2)*N:(i+j-1)*N+taps-1) = yy(1+(i+j-2)*N:(i+j-1)*N+taps-1)
        + conv(h(j,:),xx);

        yyp(1+(i+j-2)*N:(i+j-1)*N+taps_path-1) = yyp(1+(i+j-2)*N:(i+j-1)*
        N+taps_path-1)+ conv(H_path,yy(1+(i+j-2)*N:(i+j-1)*N));

        % Se realiza la resta d-yyp que corresponde al error "ee"
        ee = dd-yyp(1+(i+j-2)*N:(i+j-1)*N);
        e(1+(i+j-2)*N:(i+j-1)*N)=ee;

        % Se calcula el nivel del error (sólo en la segunda mitad de la
        ventana)
        Le(j)= sum(abs(ee(N/2:N)));

        % Se calcula el nivel de la señal de entrada (sólo en la segunda
        mitad de la ventana)
        Lx(j)= sum(abs(xx(N/2:N)));

        % ESR Error Signal Ratio
        % Se dividen ambas magnitudes para calcular el ESR (parámetro de
        optimización)
        ESR(j)=Le(j)/Lx(j);

    end

    % Se busca el mínimo ESR para seleccionar el filtro

    Min =ESR(1); % Se parte del primero
    C = h(1,:); % Primer filtro genético seleccionado

    for j= 2:NFIR % Se busca el mínimo
        if ESR(j)< Min
            Min=ESR(j);
            C = h(j,:); % Se actualiza el filtro seleccionado
        end
    end
end

```

```
minimos=[minimos Min]; %Se almacena la secuencia de mínimos para
                        comprobar funcionamiento
% El filtro seleccionado se muta para obtener nuevos filtros

for j= 1:NFIR
    h(j,:) = C + Min*(mutation/100)*2*(rand(1,taps)-0.5); %la mutación
    depende del ESR mínimo alcanzado
end

%Se asegura que los coeficientes no superen los valores máximos (+1,-1)

h=min(h,1);
h=max(h,-1);
end
```

El proceso que sigue el código se explica a continuación:

Se selecciona el número de bloques de datos de las señales “x” y “d”, es decir, cuántas ventanas de N muestras se van a utilizar en el proceso. Después, se inicializan los coeficientes del filtro de manera aleatoria, creando una matriz de un determinado número de filtros genéticos, y los vectores de datos (señal de error, señal de salida del filtro genético y señal de salida filtrada con la función de transferencia). El número de iteraciones va a depender del número de filtros seleccionado (si el número de filtros genéticos es 5, se realizarán 5 iteraciones).

Por cada iteración se toma una ventana de N datos de la señal “x” y una ventana de N datos de la señal “d”. Cada uno de los filtros coge ventanas de muestras distintas, es decir, de forma secuencial. Se realiza la convolución del trozo de entrada con el filtro genético (entran N datos y salen N+taps-1 datos), y se suma con los datos anteriores al haber solapamiento entre ventanas. Este solapamiento se produce porque el número de datos de la señal de salida del filtro FIR es mayor que el número de datos de la señal de entrada (como se ha comentado anteriormente, salen N+taps-1 datos), es decir, hay más datos en la salida que en la entrada. Por lo tanto, como las ventanas de datos de la señal de entrada entran de N en N bloques de forma secuencial al filtro y salen también de N en N, pero con una longitud superior, los últimos datos de salida de una ventana se suman (solapan) con los primeros datos de la ventana siguiente.

Posteriormente, se realiza la convolución entre la salida del filtro FIR y el vector de datos de la función de transferencia  $H_{\text{path}}(z)$ , siguiendo el mismo proceso de antes (en este caso también se produce solapamiento ya que la función de transferencia va a introducir ceros en el vector de datos de entrada a dicha función, por lo que la longitud de salida será mayor que la de entrada).



Después se realiza la resta entre la señal deseada y la salida del filtro  $H_{\text{path}}(z)$ , lo que se corresponde con el error. Se calcula el error cuadrático medio de la señal de error (nivel del error) y el nivel de la señal de entrada en la segunda mitad de la ventana, para asegurarnos que el retardo que existe entre la señal de entrada y la señal deseada (producido por la longitud del filtro FIR adaptativo junto con el existente en la función de transferencia  $H_{\text{path}}(z)$ , es decir, el retardo altavoz-micrófono), no afecte a la estimación del nivel de la señal de error.

Se dividen ambas magnitudes para calcular el parámetro de optimización (nivel de error/nivel de la señal), buscando el mínimo para seleccionar el filtro. Una vez encontrado el filtro que ha obtenido menor error con los datos aleatorios de entrada, se muta para obtener nuevos filtros mediante el parámetro de mutación. Dicha mutación va a depender del parámetro de optimización.

# **5 Simulación del algoritmo genético. Resultados obtenidos**



En este capítulo se muestran los resultados obtenidos con el diseño del sistema de control activo de ruido anteriormente expuesto. Se evalúan los resultados tanto con ruido aleatorio como con una senoide + ruido, para poder ver la diferencia entre ambos.

Para obtener dichos resultados, se modifican los parámetros mostrados a continuación.

- Retardo de la función de transferencia de la señal deseada respecto a la señal de entrada (delay1).
- Retardo de la función de transferencia entre la señal de salida y la señal de error,  $H(z)$ , (delay2).
- Número de filtros (población).
- Longitud de los filtros (coeficientes, -cromosomas-).
- Factor de mutación (en porcentaje).
- Longitud de los bloques de datos (ventana de análisis del error).

La selección de estos parámetros se realiza mediante simulación y ajuste hasta conseguir los valores más estables en las circunstancias concretas del escenario y ruido de cancelación.

## 5.1 Resultados con ruido aleatorio

Se ha creado una señal aleatoria en Matlab como señal de prueba:

```
ruido = 2*(rand(1,1000000)-0.5);
```

A continuación se modifican los parámetros de la función y se muestran las gráficas correspondientes.

### 5.1.1 Variación del retardo (delay1 y delay2)

El controlador tiene que cambiar la fase y la amplitud de la señal de referencia para hacerla coincidir en oposición de fase con la señal de ruido que recoge el micrófono de error. Atenuará o amplificará la señal de entrada para modificar la amplitud al valor deseado y cambiará la fase de la misma mediante retardos.

Por lo tanto, los retardos son necesarios para asegurar la causalidad del sistema. Para que el controlador pueda ser causal, es decir, aplicar el retardo adecuado para cambiar la fase de la señal, se ha de cumplir la condición siguiente:  $\text{delay2} < \text{delay1}$ .

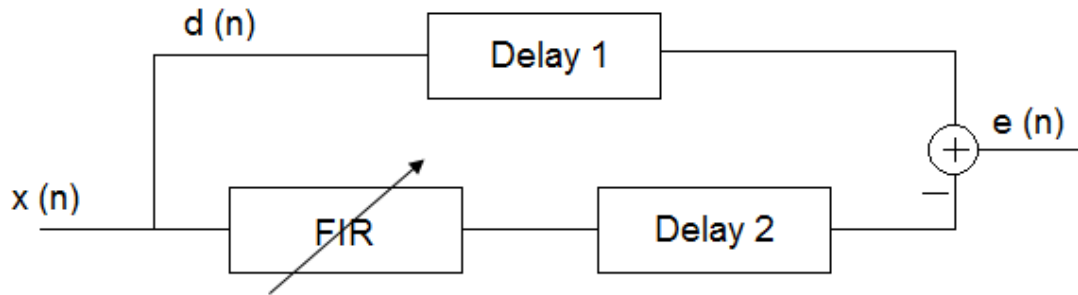


Figura 35. Retardos del sistema.

El resto de parámetros elegidos para la simulación son los siguientes:

- Número de filtros genéticos: 12 (población)
- Longitud de los filtros (coeficientes): 16 cromosomas
- Parámetro de mutación (porcentaje): 20
- Longitud ventana (bloque) N: 512 muestras
- Delay2: 5 (periodos de muestreo)

A continuación se muestran las gráficas obtenidas mediante la modificación del parámetro delay1.

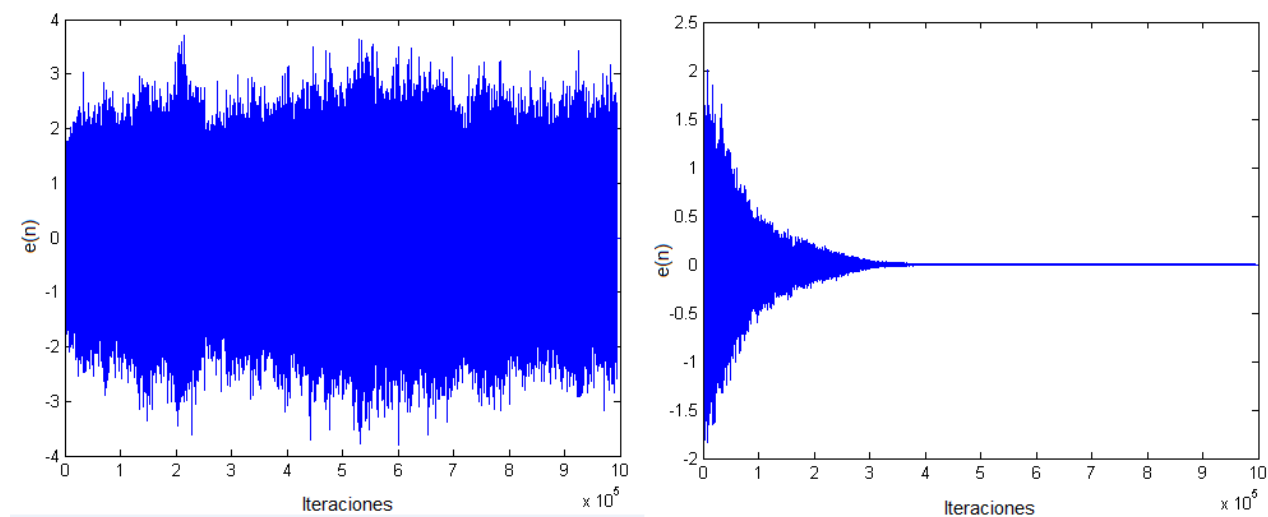


Figura 36. Señal de error con delay1 = 3 (izq) y delay1 = 8 (dcha).

Como se puede observar en la Figura 36, cuando  $\text{delay1} < \text{delay2}$ , el sistema no es causal y por tanto no se consigue minimizar el error; en cambio cuando  $\text{delay1} > \text{delay2}$  el error se minimiza hasta ser prácticamente 0.

Si el retardo de propagación es demasiado grande, la señal deseada pierde correlación con la señal de entrada. Hay que poner un filtro con una mayor longitud ( $>16$ ) para que sea capaz de converger a un mínimo.

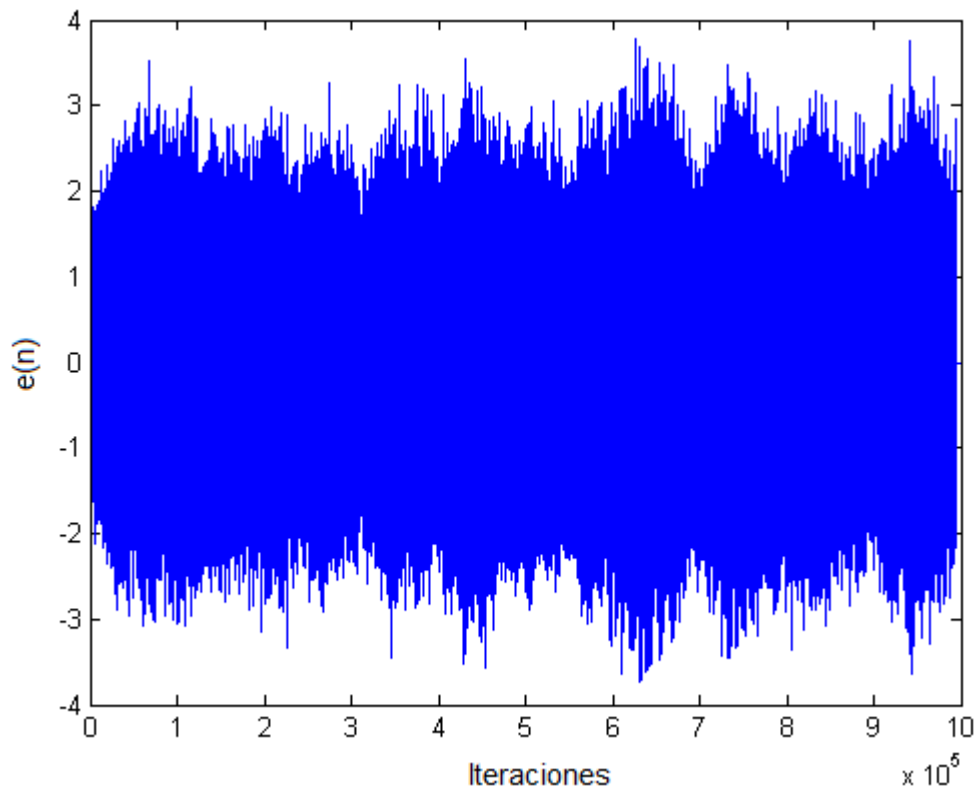


Figura 37. Señal de error con  $\text{delay1} = 20$  y  $\text{delay2} = 5$

Si el parámetro a modificar es  $\text{delay2}$  y se fija  $\text{delay1}$  con un valor de 13, el resultado es el siguiente:

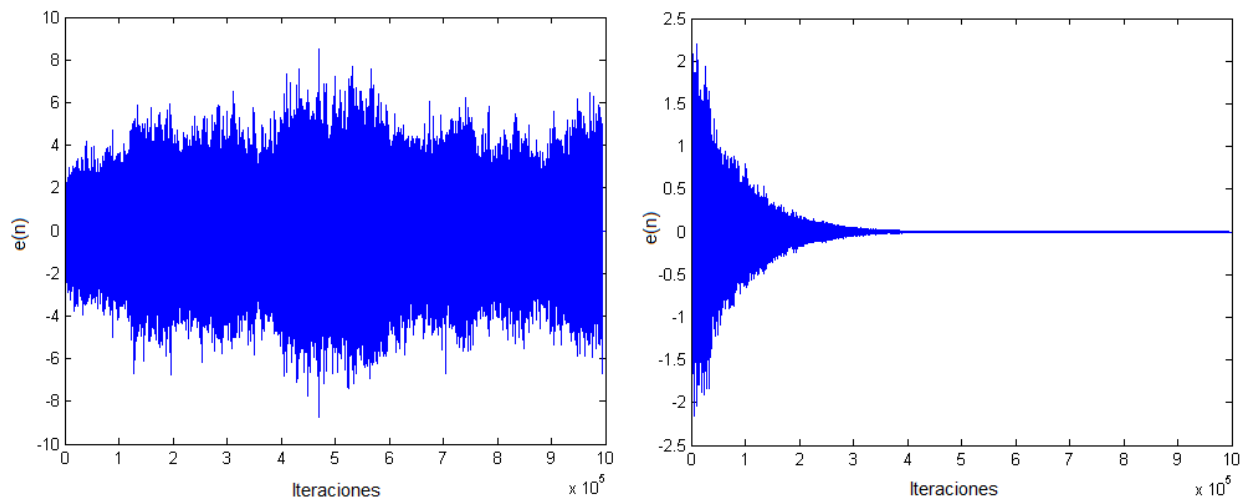


Figura 38. Señal de error con delay2 = 5 (izq) y delay2 = 15 (dcha).

Es decir, se produce convergencia al haber causalidad en el sistema.

### 5.1.2 Número de filtros genéticos

Otro parámetro importante a tener en cuenta es el número de filtros genéticos que se van a utilizar en el algoritmo, en términos de algoritmos genéticos la población de individuos en cada generación. Cuantos más filtros se seleccionen, el error obtenido se acercará antes al mínimo puesto que habrá un rango mayor de opciones donde elegir el valor más óptimo.

El resto de parámetros elegidos para la simulación son los siguientes:

- Número de filtros genéticos: 12 (población)
- Longitud de los filtros (coeficientes): 16 cromosomas
- Parámetro de mutación (porcentaje): 20
- Longitud ventana (bloque) N: 512 muestras
- Delay1: 13 (periodos de muestreo)
- Delay2: 5 (periodos de muestreo)

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

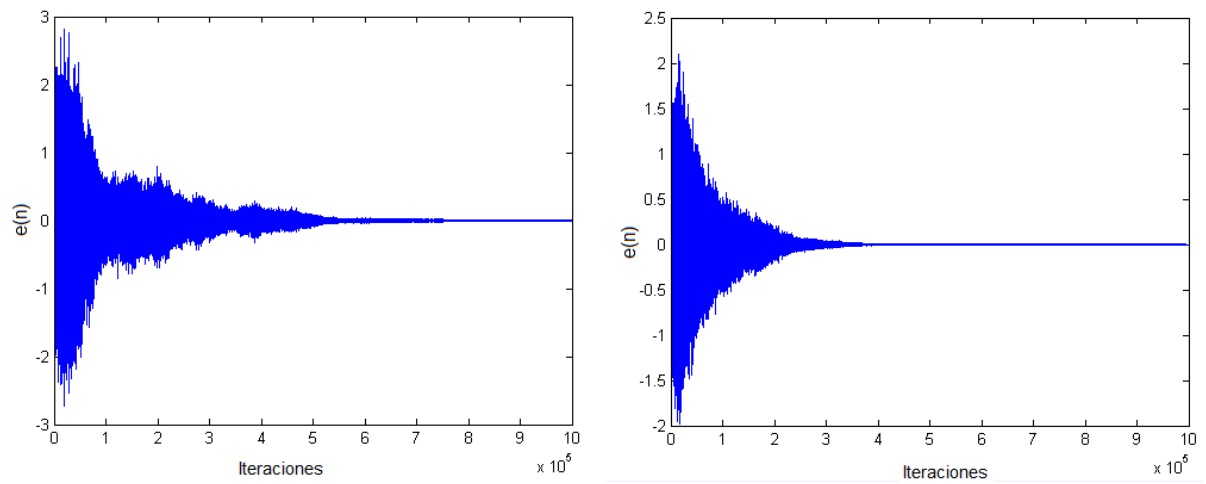


Figura 39. Señal de error con número de filtros=4 (izq) y número de filtros=12 (dcha).

Si seleccionamos un número muy alto de filtros, el sistema tardará mucho tiempo en encontrar aquel que haga que el error sea mínimo, como se puede ver en la siguiente figura:

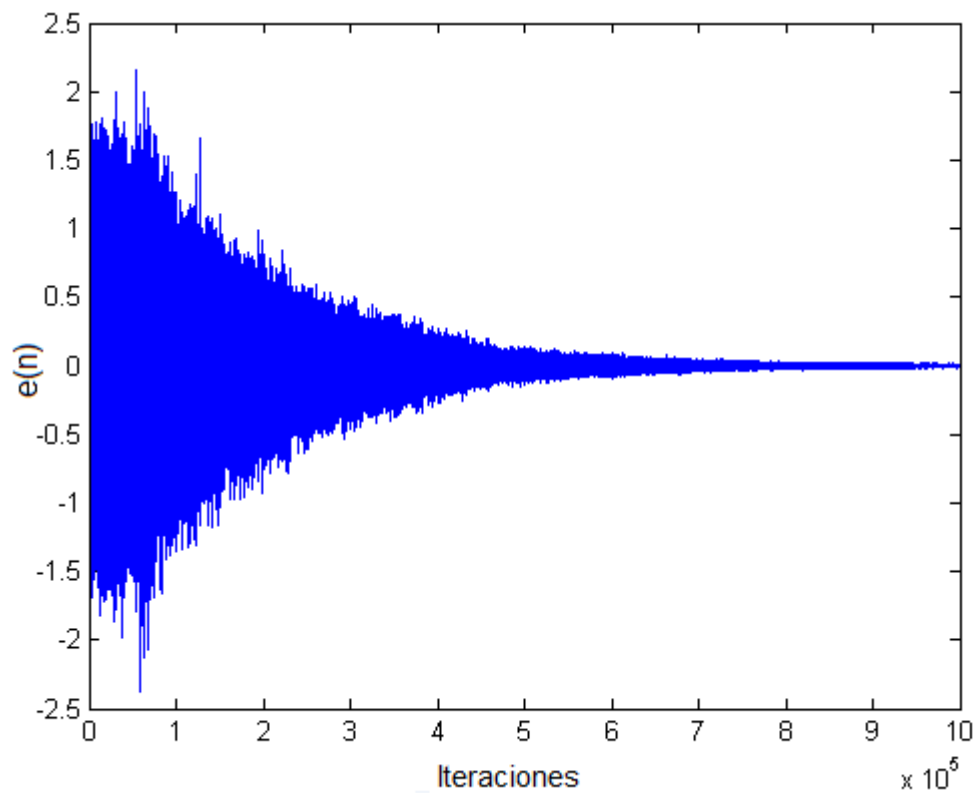


Figura 40. Señal de error con número de filtros=50.



### 5.1.3 Longitud de los filtros genéticos (coeficientes, -cromosomas-)

Como se comentó en la parte de teoría, el número de coeficientes de los bloques de datos determina el máximo retardo que puede aplicar el filtro FIR a los datos de entrada  $x(n)$ . El retardo máximo, dado en segundos, que puede aplicar un filtro FIR a unos datos de entrada  $x(n)$ , es el número de coeficientes del filtro  $M$  dividido por la frecuencia de muestreo. Por tanto, este parámetro será un factor importante en el diseño del controlador.

Se realizaron pruebas con los siguientes parámetros:

- Número de filtros genéticos: 12 (población)
- Parámetro de mutación (porcentaje): 20
- Longitud ventana (bloque)  $N$ : 512 muestras
- Delay1: 13 (periodos de muestreo)
- Delay2: 5 (periodos de muestreo)

El número de coeficientes óptimo de los filtros FIR obtenido fue 16. El resultado se muestra en la Figura 41.

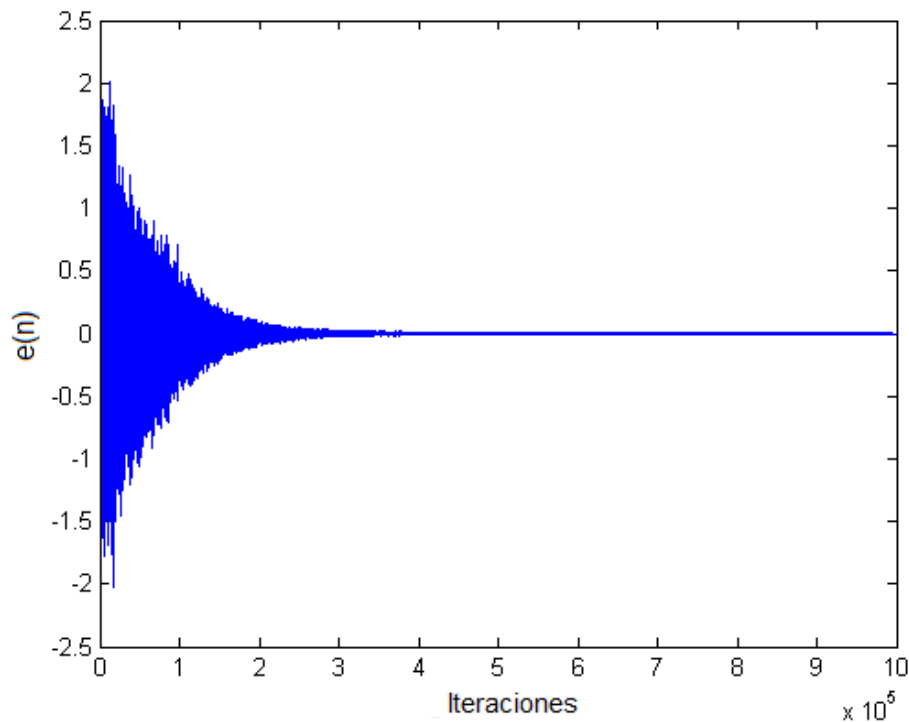


Figura 41. Señal de error longitud de coeficientes del filtro=16.

Una vez encontrado el número de coeficientes óptimo del filtro con los datos anteriormente expuestos, se procedió a aumentar el número de coeficientes, aumentando el espacio de búsqueda pero realizando siempre el mismo número de iteraciones, lo que provoca que los resultados empeoren, como se muestra en la Figura 42.

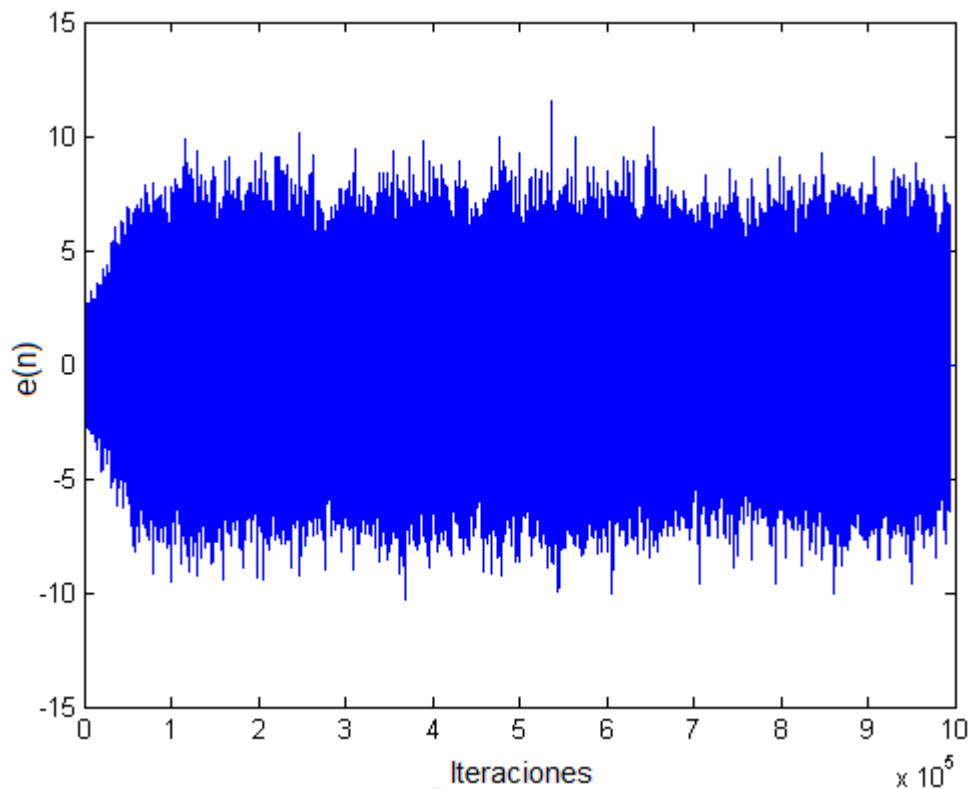


Figura 42. Señal de error con longitud de coeficientes del filtro=32.

#### **5.1.4 Ventana de análisis (bloque de muestras)**

En el proceso de selección sólo se escoge aquel cromosoma que presenta menor error cuadrático medio. La población de cromosomas de la siguiente generación se forma mutando este cromosoma, es decir, añadiendo un pequeño ruido blanco a este cromosoma. Por lo tanto, la ventana de análisis debe ser suficientemente grande para poder evaluar sin error el error cuadrático medio.

En esta ventana de análisis, sólo se evalúa el error cuadrático medio del cromosoma en la segunda mitad de la ventana. En la primera mitad de la misma, debido al retardo de la función de transferencia de cancelación, puede haber aún muestras del cromosoma anterior y daría lugar a error.

Teniendo en cuenta una longitud de los filtros de 16 coeficientes, se ha elegido para la simulación una ventana de análisis de 512 muestras.

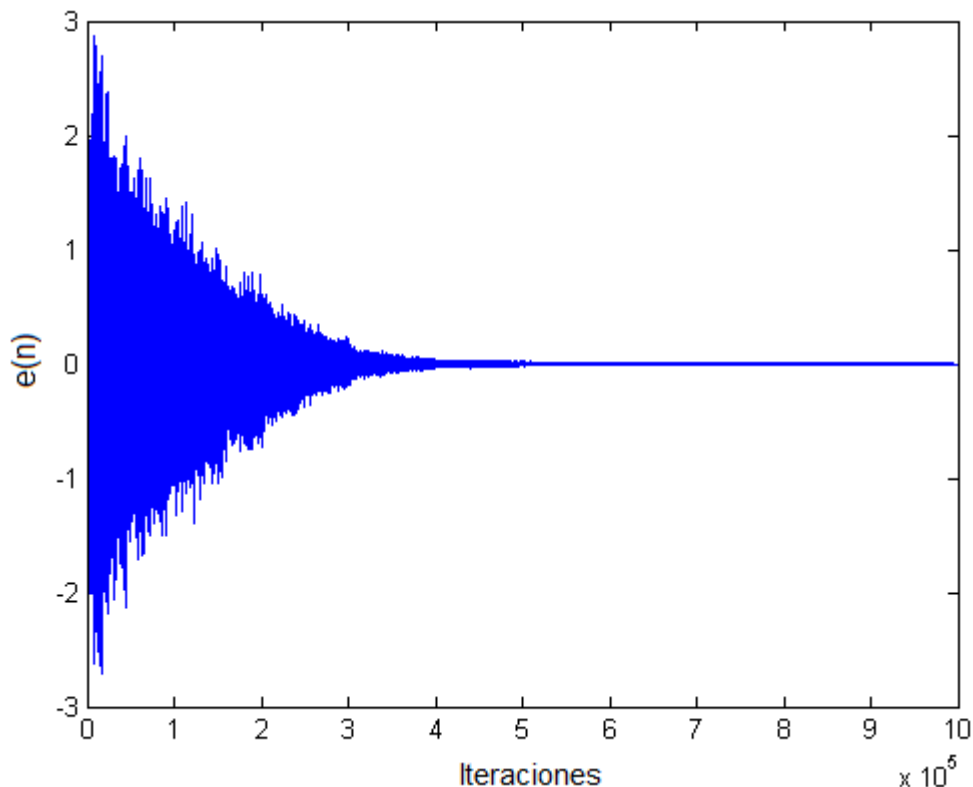


Figura 43. Señal de error con ventana de análisis de 512 muestras.

El número de coeficientes de los filtros está ligado a la longitud de las ventanas (bloque).

### 5.1.5 Mutación

La amplitud de mutación para generar una población de cromosomas en la generación siguiente determina el tiempo de convergencia y el residuo final del algoritmo. Si se escoge una amplitud de mutación excesivamente grande, nunca se llegará a estar próximo del mínimo global de la superficie de error y, además, el tiempo de convergencia será tan pequeño que el residuo final siempre será grande, por lo que la cancelación será bastante pobre ya que los coeficientes estarán rondando el valor del mínimo sin llegar a él. Si se escoge una amplitud demasiado pequeña, el tiempo de convergencia puede ser excesivamente grande y el algoritmo puede quedar “atrapado” en un mínimo local.

Para encontrar el porcentaje de mutación adecuado, se realizaron simulaciones con los datos anteriores. A continuación se muestran los resultados obtenidos con un valor de mutación del 5%, 20% y 40%.

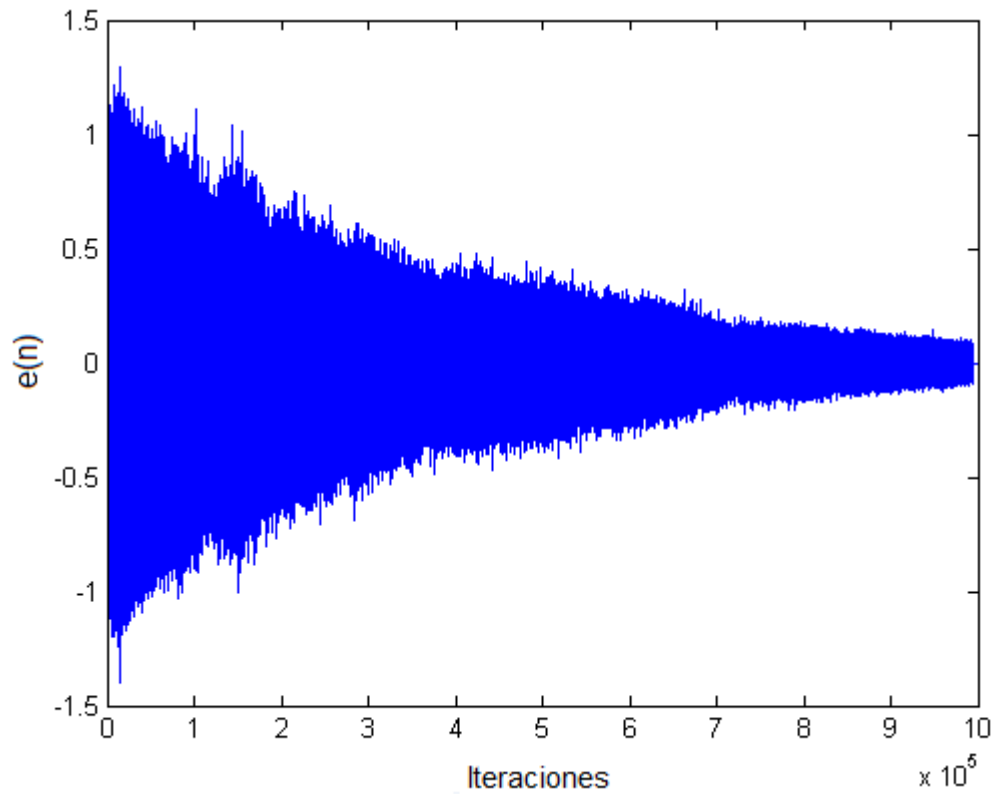


Figura 44. Señal de error con valor de mutación del 5%.

Como se puede observar en la Figura 44, si se escoge un valor de mutación muy bajo, el tiempo de convergencia es muy grande y el algoritmo tarda en encontrar el mínimo, incluso puede que no lo llegue a encontrar porque se ha quedado atrapado en un mínimo local.

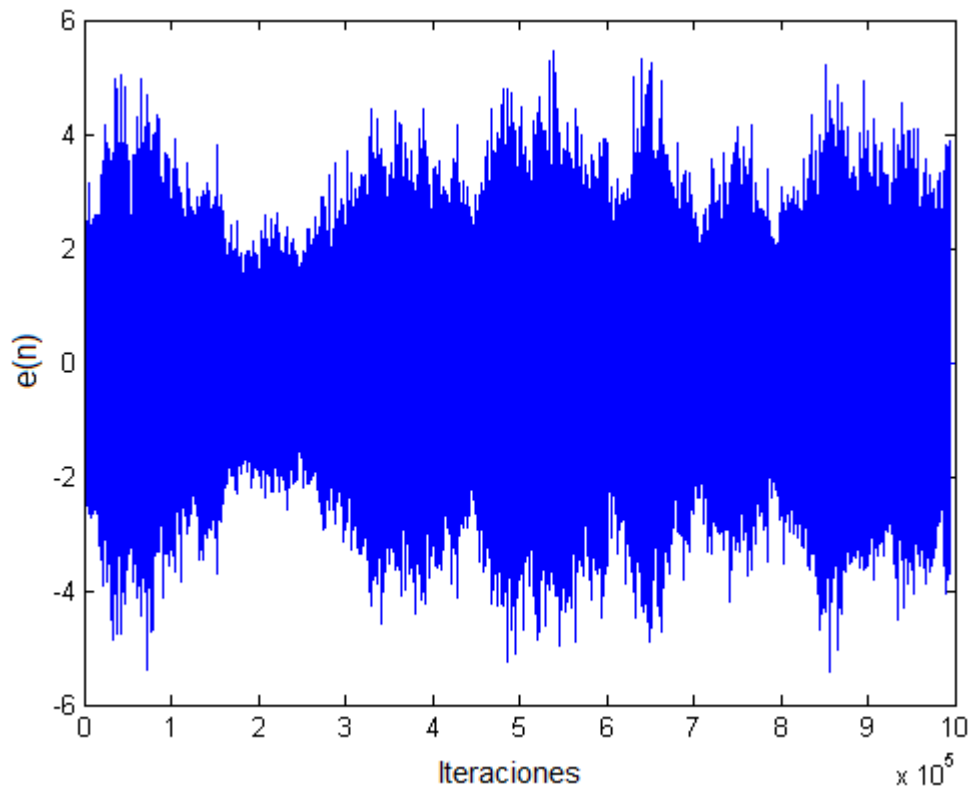


Figura 45. Señal de error con valor de mutación del 40%.

Como se puede ver en la Figura 46, si se escoge una amplitud de mutación excesivamente grande, no se llega a estar próximo del mínimo global de la superficie de error y, además, el tiempo de convergencia es tan pequeño que el residuo final es grande

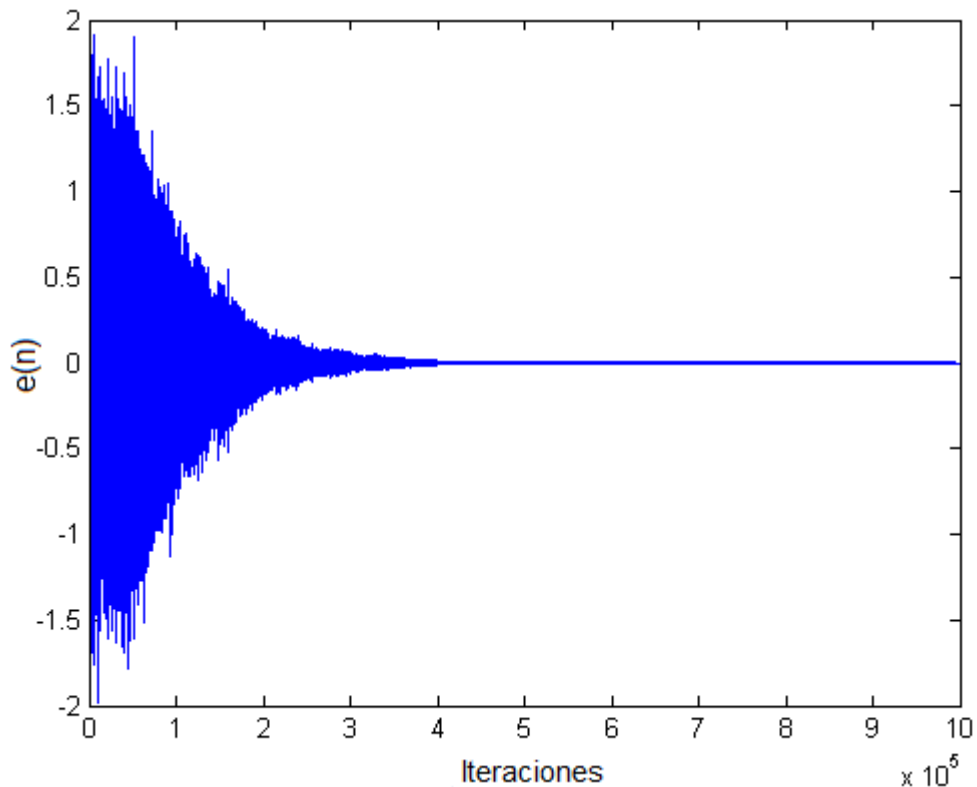


Figura 46. Señal de error con valor de mutación del 20%.

Con un valor de mutación adecuado, se consigue un residuo final prácticamente nulo en un tiempo de convergencia adecuado.

## 5.2 Resultados con señal sinusoidal + ruido

Se ha creado una señal aleatoria en Matlab como señal de prueba:

```
sinusoide=sin((pi/20)*[1:1000000]);  
ruido= 2*(rand(1,1000000)-0.5);  
x=sinusoide+0.01*ruido;
```

A continuación se modifican los parámetros de la función y se muestran las gráficas correspondientes, igual que se hizo con señal aleatoria.

### 5.2.1 Variación del retardo (delay1 y delay2)

La causalidad del sistema de control sólo ha de considerarse para ruidos acústicos aleatorios de banda ancha. En ruidos periódicos (como una sinusoide), no es necesario tener en cuenta tal causalidad ya que al repetirse la señal periodo tras periodo, el

controlador siempre es capaz de modificar la fase de la señal mediante un retardo y hacerla coincidir en réplica invertida con el ruido acústico en el micrófono.

Los parámetros seleccionados para la simulación son los siguientes:

- Número de filtros genéticos: 12 (población)
- Longitud de los filtros (coeficientes): 16 cromosomas
- Parámetro de mutación (porcentaje): 20
- Longitud ventana (bloque) N: 512 muestras
- Delay2: 5 (periodos de muestreo)

A continuación se muestran las gráficas obtenidas mediante la modificación del parámetro delay1.

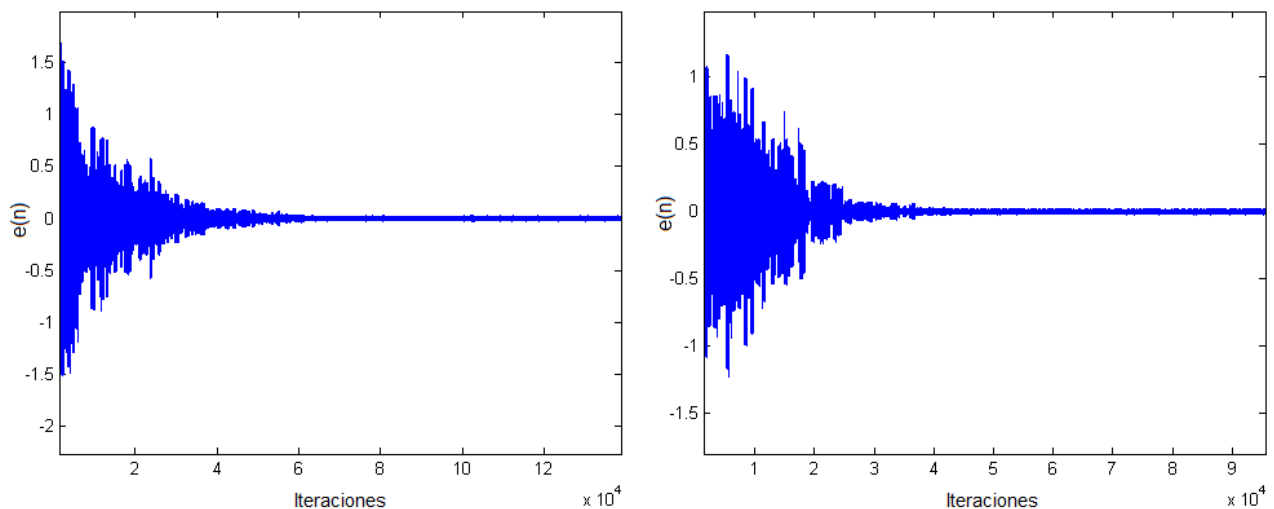


Figura 47. Señal de error con  $\text{delay1} = 3$  (izq) y  $\text{delay1} = 12$  (dcha).

Como se puede observar en la Figura 47, con diferentes retardos se llega a obtener un valor mínimo con el cual el sistema converge.

### 5.2.2 Número de filtros genéticos

Si tenemos en cuenta el número de filtros genéticos que se van a utilizar en el algoritmo, cuantos más filtros se seleccionen, menos tiempo tardará el sistema en converger puesto habrá mayor rango de opciones donde elegir el valor más óptimo.

El resto de parámetros elegidos para la simulación son los siguientes:

- Número de filtros genéticos: 12 (población)
- Longitud de los filtros (coeficientes): 16 cromosomas
- Parámetro de mutación (porcentaje): 20
- Longitud ventana (bloque) N: 512 muestras
- Delay1: 13 (periodos de muestreo)
- Delay2: 5 (periodos de muestreo)

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

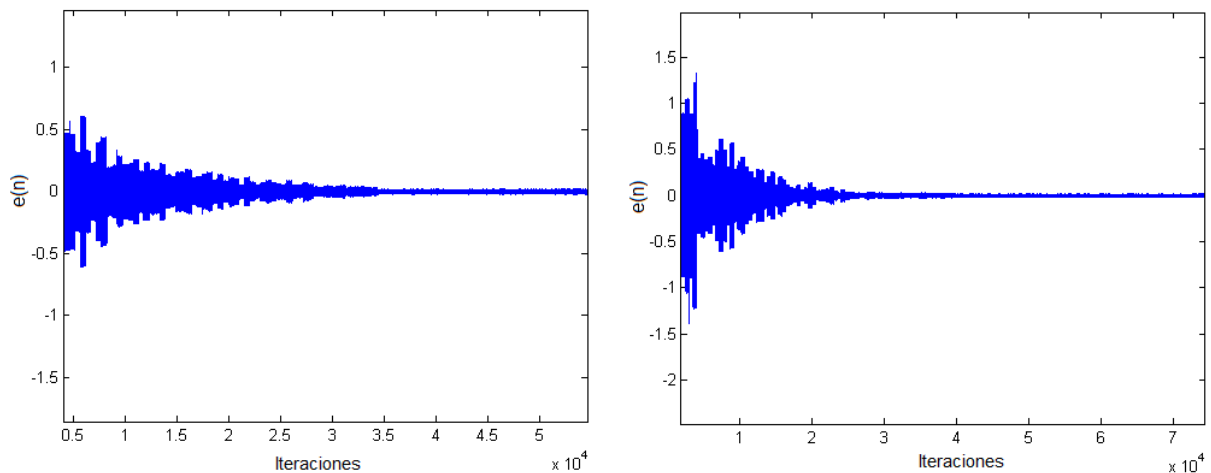


Figura 48. Señal de error con número de filtros=4 (izq) y número de filtros=8 (dcha).

Si seleccionamos un número alto de filtros, el sistema tardará más tiempo en encontrar aquel que haga que el error sea mínimo, como se puede ver en la Figura 49.



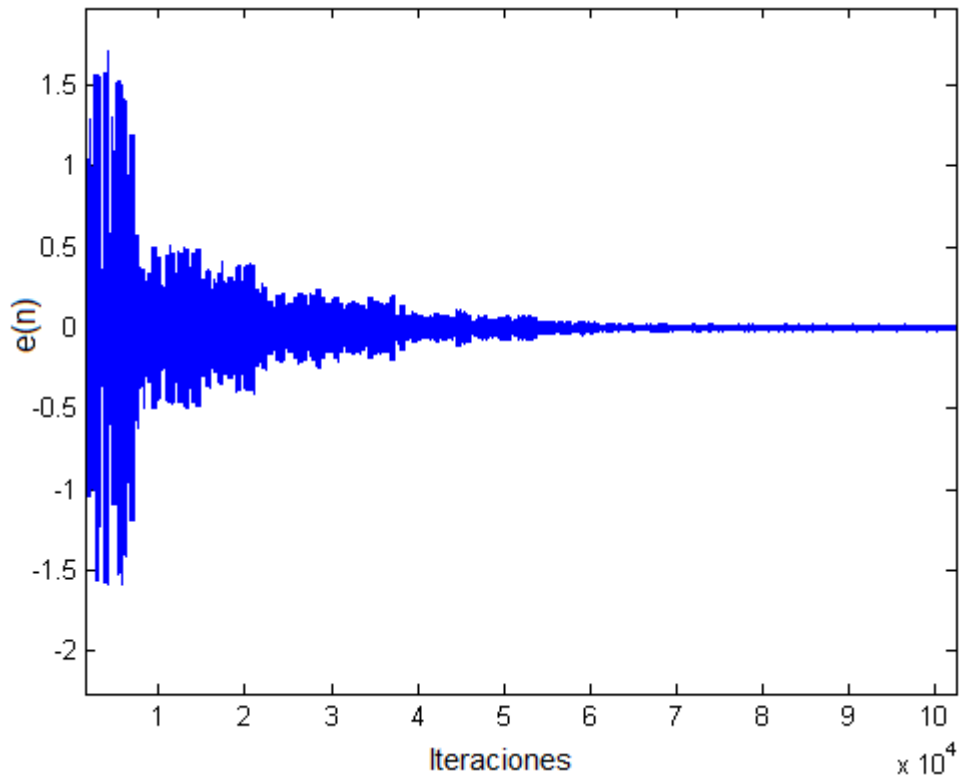


Figura 49. Señal de error con número de filtros=15.

### 5.2.3 Longitud de los coeficientes

Se realizaron pruebas con los mismos datos que con ruido aleatorio:

- Número de filtros genéticos: 12
- Parámetro de mutación (porcentaje): 20
- Longitud ventana (bloque) N: 512
- Delay1: 13
- Delay2: 5

El número de coeficientes óptimo de los filtros FIR obtenido fue 16. El resultado se muestra en la siguiente figura:

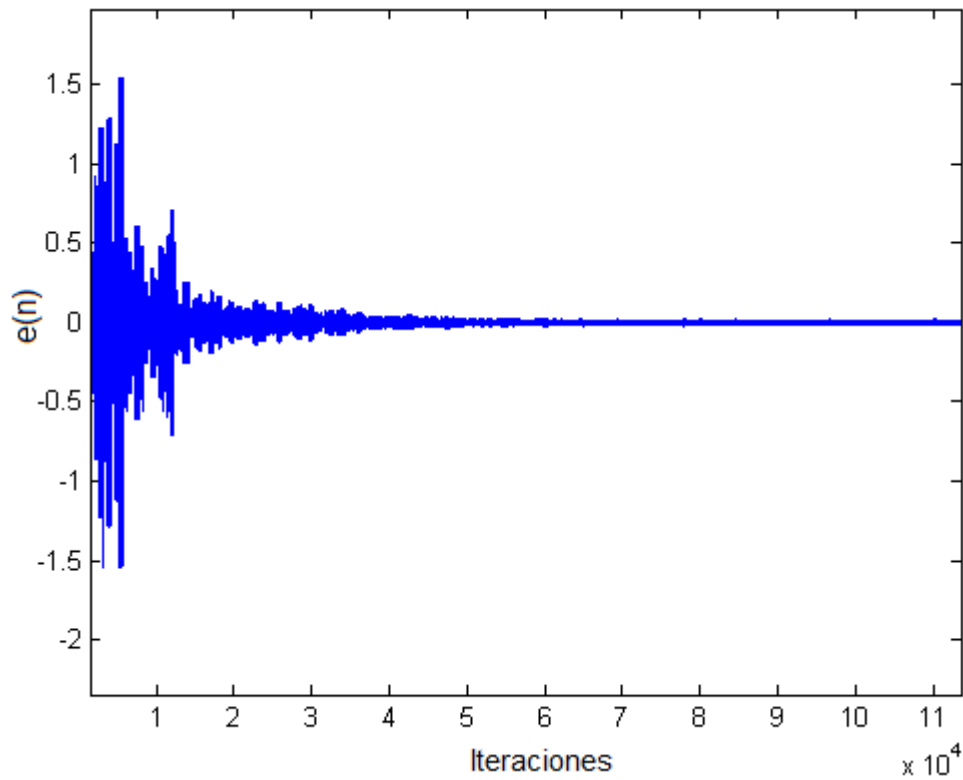


Figura 50. Señal de error longitud de coeficientes del filtro=16.

Si se utilizan filtros con pocos coeficientes, se disminuye el espacio de búsqueda, por lo que el proceso de encontrar el mínimo error será más lento, como se muestra en la Figura 51.

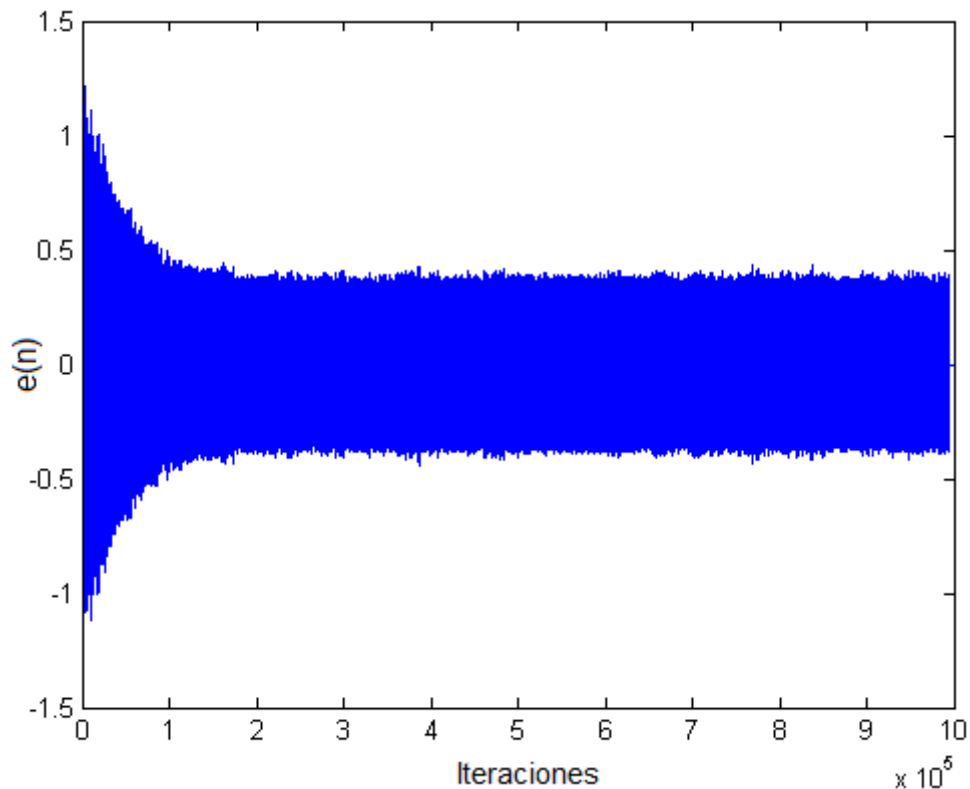


Figura 51. Señal de error longitud de coeficientes del filtro=4.

#### **5.2.4 Ventana de análisis (bloque de muestras)**

Como se comentó anteriormente, en el proceso de selección sólo se escoge aquel cromosoma que presenta menor error cuadrático medio. La población de cromosomas de la siguiente generación se forma mutando este cromosoma, es decir, añadiendo un pequeño ruido blanco a este cromosoma.

Teniendo en cuenta una longitud de los filtros de 16 coeficientes, se ha realizado la simulación con una ventana de análisis de 64 muestras y otra de 512 muestras.

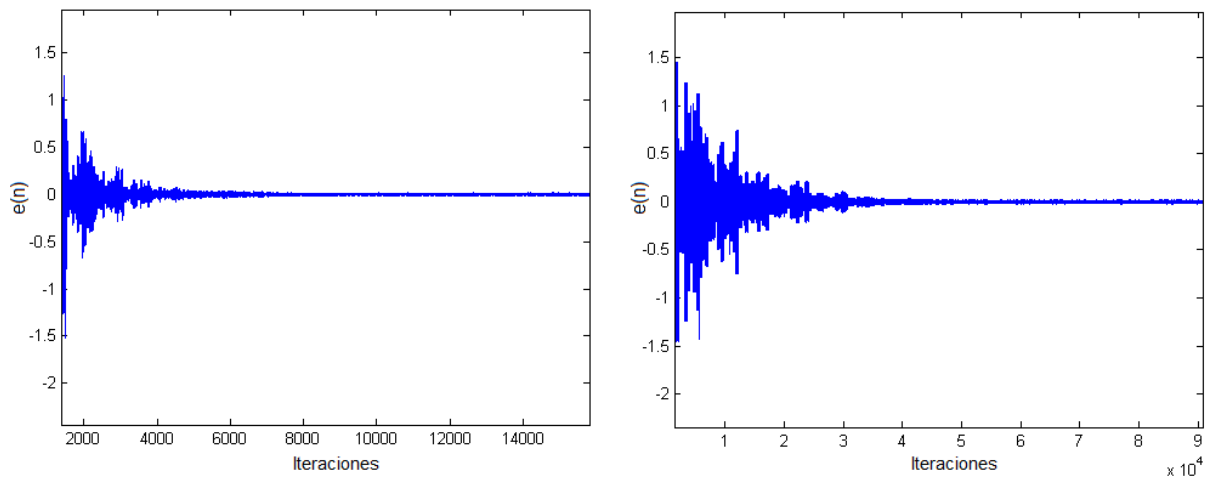


Figura 52. Señal de error con ventana de análisis de 64 muestras (izq) y 512 muestras (dcha).

Ambos sistemas convergen, pero el que tiene menos muestras necesita menos tiempo, ya que tiene menos datos que evaluar. Aún así, la ventana de análisis debe ser suficientemente grande para poder evaluar sin error el error cuadrático medio.

### 5.2.5 Mutación

La amplitud de mutación determina el tiempo de convergencia y el residuo final del algoritmo. Si se escoge una amplitud de mutación excesivamente grande, nunca se llegará a estar próximo del mínimo global de la superficie de error y, además, el tiempo de convergencia será tan pequeño que el residuo final siempre será grande, por lo que la cancelación será bastante pobre ya que los coeficientes estarán rondando el valor del mínimo sin llegar a él. Si se escoge una amplitud demasiado pequeña, el tiempo de convergencia puede ser excesivamente grande y el algoritmo puede quedar “atrapado” en un mínimo local.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con un valor de mutación del 5% y 20%.

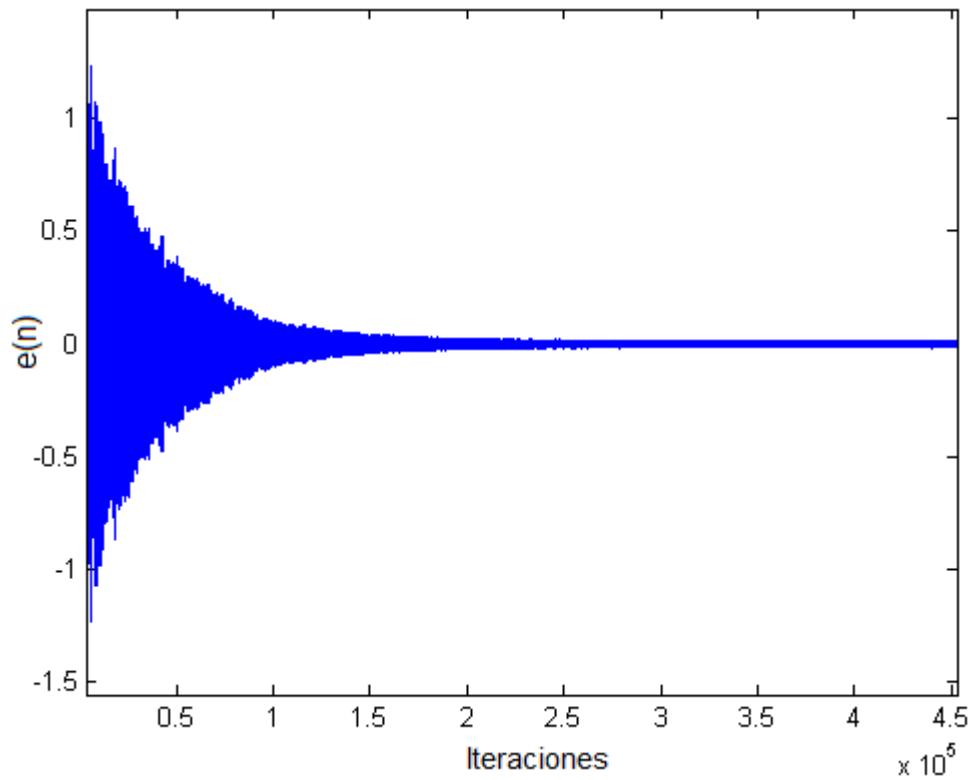


Figura 53. Señal de error con valor de mutación del 5%.

Como se puede observar en la Figura 53, si se escoge un valor de mutación muy bajo, el tiempo de convergencia es muy grande y el algoritmo tarda en encontrar el mínimo.

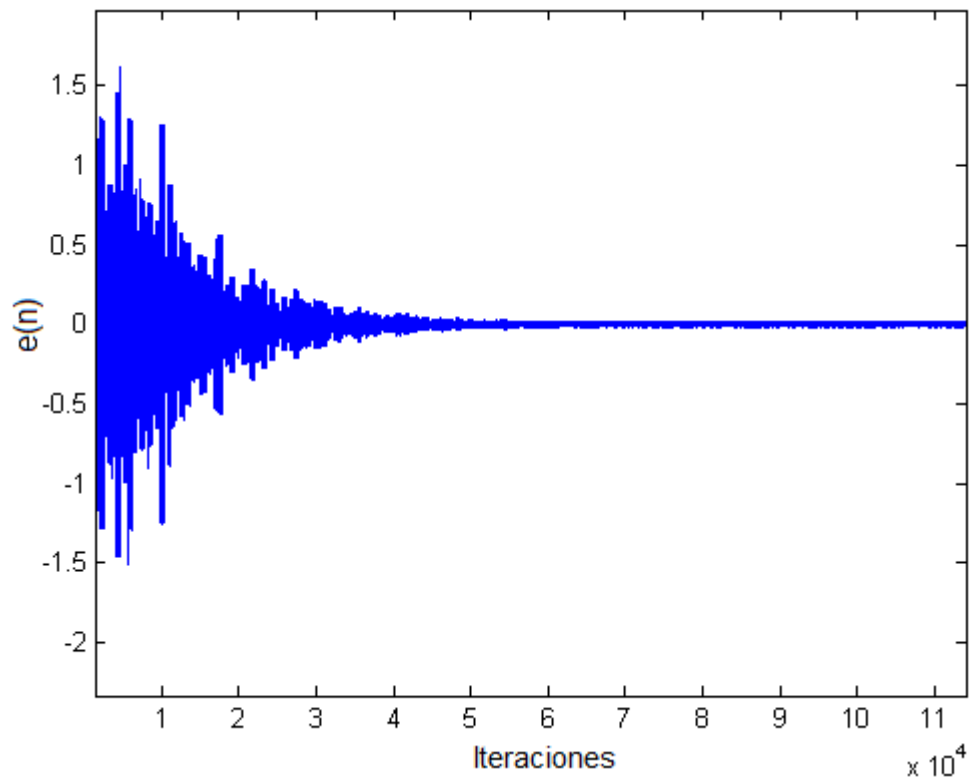


Figura 54. Señal de error con valor de mutación del 20%.

Con un valor de mutación adecuado, se consigue un residuo final prácticamente nulo en un tiempo de convergencia adecuado.



# 6 Conclusiones





En este capítulo se expondrán las conclusiones del proyecto. Como se comentó al inicio del mismo, el principal objetivo era la implementación de un sistema de control activo de ruido mediante algoritmos genéticos, con el fin de poder explicar mediante simulaciones las ventajas e inconvenientes de usar este tipo de algoritmo en control activo de ruido.

Primeramente se han explicado los conceptos necesarios para poder seguir el proyecto, centrándonos en la idea de qué se entiende por control activo de ruido: aquella técnica capaz de atenuar, eliminar o cancelar el ruido acústico, en una determinada zona del medio elástico donde se propagan sus ondas de presión acústica.

La parte principal es el diseño del controlador. Este ha de ser capaz de seguir todas las posibles variaciones del campo acústico que puedan producirse (variaciones de fase, de frecuencia, de amplitud, de funciones de transferencia electro-acústicas, etc.). Los principales elementos que se han tenido en cuenta para su diseño han sido el tipo de filtro y el algoritmo adaptativo que se van a utilizar.

En cuanto al filtro, se tuvo en cuenta las características del tipo de ruido que se quería cancelar y las características propias de los filtros FIR e IIR. Por tanto, se evaluaron características tales como estabilidad, linealidad y coste computacional. El filtro elegido fue el tipo FIR, ya que asegura estabilidad y puede tener respuesta de fase lineal, a pesar de requerir mayor número de coeficientes y por tanto un mayor coste computacional (cálculo y registros de memoria).

Para que la función de transferencia del controlador siga las variaciones que surgen en el entorno acústico de cancelación, tiene que ir variando el valor de los coeficientes del filtro mediante un algoritmo adaptativo. En la memoria se ha hablado del algoritmo adaptativo LMS, algoritmo adaptativo de entrada filtrada filtered-X LMS y del algoritmo genético, en el cual está basado este proyecto. Este algoritmo opera de forma simultánea con varias soluciones, pudiendo desechar aquella que sea menos óptima y seguir por otro camino, lo que conlleva una gran cantidad de cómputo y velocidad de convergencia (búsqueda del mínimo error) más lenta. Sin embargo, la complejidad del sistema de control es inferior a los algoritmos adaptativos basados en el gradiente de la superficie del error, ya que no es necesario estimar funciones de transferencia electroacústicas en paralelo (altavoz-camino acústico-micrófono de error) para la convergencia del algoritmo adaptativo.

Una vez elegido el tipo de filtro y algoritmo, se procedió al diseño del algoritmo genético. Un diseño simplificado en comparación con otros algoritmos genéticos utilizados en ámbitos de optimización ajenos al procesamiento de señales.

Tras las simulaciones realizadas, se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

- Si la señal de entrada es ruido aleatorio, para que el controlador pueda ser causal, el retardo aplicado a la señal deseada debe ser mayor que el de la señal filtrada (señal de entrada). Si es ruido periódico, no hay que tener en cuenta tal causalidad ya que el controlador es capaz de modificar la fase de la señal mediante un retardo y hacerla coincidir en réplica invertida.
- A mayor número de filtros, el sistema garantiza la convergencia hacia el valor más óptimo. Pero si se selecciona un número muy alto, el sistema tardará mucho en encontrar aquel que haga que el error sea mínimo.
- La ventana de análisis debe ser suficientemente grande para poder evaluar con precisión el error cuadrático medio.
- Si se escoge una amplitud de mutación excesivamente grande, nunca se llegará a estar próximo del mínimo global de la superficie de error y, además, el tiempo de convergencia será tan pequeño que el residuo final siempre será grande, por lo que la cancelación será bastante pobre ya que los coeficientes estarán oscilando alrededor del valor del mínimo sin llegar a él. Si se escoge una amplitud demasiado pequeña, el tiempo de convergencia puede ser excesivamente grande y el algoritmo puede quedar “atrapado” en un mínimo local.

Las afirmaciones anteriores valen tanto para ruido aleatorio como para ruido periódico, pero los resultados obtenidos indican que si la señal de entrada es una señal periódica y los parámetros evaluados anteriormente no son los óptimos, el sistema siempre podrá converger aunque sea lentamente; en cambio con ruido aleatorio puede ser que el sistema no pueda encontrar un valor óptimo y no consiga converger en todo el proceso.

# **7**

## **Referencias bibliográficas**



- [1] Lueg P., "Process of silencing sound oscillations," U.S. Patent 2,043,416 27, 1933
- [2] Olson H.F., "Electronic Control of Noise, Vibration, and Reverberation," J. Acoustic. Soc. Am., Vol. 28, 966-972, 1956.
- [3] Conover W.B., "Fighting Noise with Noise", Noise Control 2, pp. 78-82, 1956.
- [4] Nelson P.A. and Elliott S.J., "Active Control of Sound", Academic Press, 1992.
- [5] Lueg P., "Process of silencing sound oscillations," U.S. Patent 2,043,416 27, 1933.
- [6] Garcia-Bonito J. and Elliott S.J., "Strategies for Local active Control in Diffuse Sound Fields", Proc. of ACTIVE 95, pp. 561-572, July 1995.
- [6] Elliot S.J. and Nelson P.A., "Active Noise Control," IEEE Signal Processing Magazine, pp. 12-35, October 1993.
- [7] Liu C.Y., and Ma Y.L., "An Acoustic Field-Fitting Method for Free Field Active Noise Control", Proc. of Inter-Noise 89, pp. 505-508, Dec. 1989.
- [8] Guicking D., Karcher K. and Rollwage M., "Coherent Active Methods for Applications on Room Acoustics", J. Acoustic. Soc. Am., 87, pp. 2251-2254, 1990.
- [9] Nelson P.A. and Elliott S.J., Active Control of Sound, Academic Press, 1990.
- [10] Guicking D., Karcher K. and Rollwage M., "Coherent Active Methods for Applications on Room Acoustics", J. Acoustic. Soc. Am., 87, pp. 2251-2254, 1990.
- [11] Widrow B., Glover J.R., McCool J.M. et al. "Adaptive noise cancelling principles and applications," Proceedings of the IEEE 63, pp. 1692-1716, 1975.
- [12] Olson H.F., "Electronic Control of Noise, Vibration, and Reverberation," J. Acoustic. Soc. Am., Vol. 28, 966-972, 1956.
- [13] Sievers L.A. and Flotow A.H., "Comparisons and Extensions of Control Methods for Narrow-Band Disturbance Rejection", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 40, No. 10, pp. 2377-2391, October 1992.

- [14] Sievers L.A. and Flotow A.H., "Comparisons and Extensions of Control Methods for Narrow-Band Disturbance Rejection", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 40, No. 10, pp. 2377-2391, October 1992.
- [15] Elliot S.J. and Nelson P.A., "Active Noise Control," IEEE Signal Processing Magazine, pp. 12-35, October 1993.
- [16] Mínguez A. and Recuero M, "Auriculares Activos de Protección contra el Ruido Acústico", Proc. of URSI 94, Valencia, Spain, Sept. 1994.
- [17] Lueg P., "Process of Silencing Sound Oscillations," German Patent 655.508, 1933.
- [18] Elliott S.J. et al., "A multiple error LMS algorithm and its application to the active noise control of sound and vibration", IEEE Trans. on ASSP, ASSP-35, 1987, pp. 1423-1434.
- [19] Snyder S.D. and Tanaka N., "A neural network for feedforward controlled smart structures", Journal of Intelligent Material and Structures, 4, pp. 373-378, 1993.
- [20] Wangler C.T. and Hansen C.H., "Genetic algorithm adaptation of nonlinear filter structures for active sound and vibration control", IEEE Inter. Conf. On ASSP, 3, pp. 505-508, 1994.
- [21] Darwin, C. "On the Origin of Species by Means of Natural Selection", 1859.
- [22] Goldberg D.H., Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning, New York: Addison-Wesley, 1989.
- [23] Goldberg D.H., Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning, New York: Addison-Wesley, 1989.
- [24] Darwin, C. "On the Origin of Species by Means of Natural Selection", 1859.
- [25] De Jong K., "Learning with the genetic algorithm: an overview", Machine Learning, vol. 3, pp. 121-137, Oct. 1988.
- [26] Mínguez A. "A Simple Genetic Algorithm for Active Noise Control", Proceedings of ICA1998. Seattle 1998